



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

Modélisation et simulation d'une
microcentrale hybride hydro-éolienne

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN INGÉNIERIE

PAR

HERMINE KENGNE

Décembre 2021

Résumé

La croissance démographique, la saturation des réseaux de transport d'énergie électrique, les coûts de construction des lignes de transport, la migration vers les énergies renouvelables et bien sûr l'installation des industries ou des sites d'habitation dans des endroits éloignés du réseau électrique existant, sont les principales raisons qui aujourd'hui poussent les ingénieurs à s'investir sur des microcentrales de production isolées des principaux réseaux d'alimentation et capable de combler les besoins énergétiques des populations et industriels concernés, en utilisant les ressources énergétiques disponibles à proximité. Les ressources utilisées ici étant l'eau et le vent.

Le caractère intermittent de ces deux sources d'énergie est à l'origine de la décision de leur combinaison afin d'augmenter la fiabilité du micro-réseau ainsi constitué; Le présent travail porte alors sur les études de modélisation et de simulation d'un tel réseau afin de rendre la réalisation possible. Après une revue de littérature sur les études déjà existantes de ce type de système, on effectue une modélisation des différentes parties de la microcentrale, les équations mathématiques ainsi obtenues sont alors implémentées à l'aide du logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK® afin de simuler et de prévoir le fonctionnement en temps réel du micro-réseau.

Ce travail avait pour objectif la modélisation et la simulation d'un système biénergie hydro-éolienne, l'enjeu ici étant de faire fonctionner simultanément les deux sources de production pour l'alimentation d'une charge locale. La modélisation mathématique a donc été effectuée, ensuite l'implémentation théorique a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK®, et pour finir nous avons effectué les simulations et présenté les résultats pour plusieurs scénarios de fonctionnement afin de prouver le bon fonctionnement de la microcentrale modélisée.

Mots clés : micro-réseau, modélisation, simulation hydroélectrique, éolienne, génératrice, turbine.

Abstract

Population growth, saturation of electrical energy transmission networks, construction costs of transmission lines, migration to renewable energies and of course the installation of industries or residential sites in places far from the existing electricity grid, are the main reasons which today push engineers to work on micro-production plants isolated from the main supply networks and capable of meeting the energy needs of the populations and industrialists concerned, by using the energy resources available nearby. The resources used here are water and wind.

The intermittent nature of the energy of water and wind is at the origin of the decision to combine them to increase the reliability of the micro network thus formed; The present work then focuses on modeling and simulation studies of such a network to make the realization possible. After a review of the literature on the already existing studies of this type of system, a modeling of the different parts of the micro power plant is carried out, the mathematical equations thus obtained are then implemented using the MATLAB / SIMULINK simulation software to simulate and predict the functioning in real time as well as the behavior of our micro network in the face of contingencies.

The objective of this work was to model and simulate a dual-energy hydro-wind system, the challenge here being to operate the two production sources simultaneously to supply a local load. The mathematical modeling was therefore carried out, then the theoretical implementation was carried out using the MATLAB / SIMULINK® software, and finally a simulation and a presentation of the results for several operating scenarios was completed to prove the correct operation of the modeled micro-plant

Keywords: micro-grid, modeling, hydroelectric simulation, wind turbine, generator, turbine.

Remerciements

Réalisé à l'Université de Québec en Abitibi Témiscamingue, ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien de plusieurs personnes à qui nous tenons à exprimer notre gratitude.

Tout d'abord mon directeur de recherche, le professeur Tahar Tafticht (ing., Ph.D, UQAT) qui a su donner une bonne orientation à ce travail et qui se fait toujours disponible pour répondre aux questions.

Mon co-directeur, le professeur Nahi Kandil (ing., Ph.D, UQAT), qui a été là depuis le début de mon parcours académique et qui a su m'aider et m'orienter efficacement dans certaines prises de décisions.

Au professeur René Wamkeue (Ph.D) qui a été à l'origine de ma décision d'immigrer au Canada pour faire une maîtrise en ingénierie et qui a été très présent au début mon parcours académique.

À tous les enseignants et personnel de soutien de l'UQAT qui m'ont permis d'évoluer dans cet environnement favorable à la réussite.

À mon grand frère Arnaud Tawouo qui a été d'un soutien incontestable sous le plan financier, psychologique et moral.

À tous mes camarades de l'UQAT qui ont été présents tout au long de ce cheminement.

À tous les membres de ma famille dont l'énergie et les encouragements me poussent à me surpasser chaque jour.

Table des matières

Remerciements	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des symboles	X
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Contexte, problématique et état de l’art de l’étude.....	3
Introduction	3
1.1. Contexte et problématique.....	3
1.2. État de l’art sur les systèmes hybrides hydro/éolien.....	4
1.3. Objectifs spécifiques et méthodologie	7
Chapitre 2 : Présentation du système.....	9
Introduction	9
2.1. L’éolienne.....	9
2.1.1. Principe	9
2.1.2. Types d’éolienne	9
2.1.3. Constitution.....	11
2.1.4. La ressource primaire.....	15
2.2. La partie hydraulique	17
2.2.1. Principe	17
2.2.2. Les types de centrales hydroélectriques.....	18
2.2.3. Constitution.....	18

2.2.4.	La ressource hydraulique	22
2.3.	Le système complet	24
Chapitre 3 : Modélisation de la partie éolienne		26
3.1.	Modèle de la turbine éolienne.....	26
3.2.	La transmission mécanique.....	33
3.3.	La génératrice asynchrone.....	35
Chapitre 4 : Modélisation de la partie hydroélectrique		50
Introduction		50
4.1.	La turbine hydraulique.....	50
4.2.	La génératrice synchrone.....	59
4.2.1.	Modèle électrique de la génératrice synchrone	61
4.2.1.	Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park.	64
4.3.	Le système d'excitation de la génératrice synchrone.....	67
4.3.1.	Le filtre passe bas.....	69
4.3.2.	Le régulateur de tension.....	69
4.3.3.	Le filtre d'amortissement.....	70
4.3.4.	Le compensateur.....	70
4.3.5.	L'excitatrice proprement dite	70
Conclusion.....		72
Chapitre 5 : Simulation, présentation et discussion des résultats.....		73
Introduction		73
5.1.	Modèle complet du système	73
5.2.1.	Hypothèse de conception	73
5.2.2.	Présentation du modèle.....	74

5.2. Simulation et présentation des résultats.....	77
5.2.1. Simulation avec une plage de vitesse de vent faible variant de manière aléatoire de 5 à 10 m/s.	77
5.2.2. Simulation pour des vents allant de 8 à 15 m/s.....	82
5.2.3. Simulation avec une vitesse de vent constante égale à 12 m/s	84
5.2.4. Simulation pour une charge de 250kw +150kw qui s'ajoute à 2.5 secondes.	85
Conclusion.....	88
Conclusion générale et perspective.....	89
Références	91

Liste des figures

Figure 1: Types d'éoliennes; à axe horizontal (a) et à axe vertical (b) [23] ...	10
Figure 2: Les parties d'une éolienne [24]	15
Figure 3: Distribution de Weibull	16
Figure 4: Types de turbines en fonction de la hauteur de chute [27]	20
Figure 5: Constitution d'une centrale hydroélectrique	22
Figure 6: Système complet simplifié.....	25
Figure 7: Modélisation du coefficient de puissance.....	28
Figure 8: coefficients de puissance en fonction des types d'éolienne [33]	29
Figure 9: Courbe de puissance d'une éolienne	30
Figure 10: Modélisation de la puissance extraite du vent	31
Figure 11: Modélisation du couple mécanique	32
Figure 12: schéma bloc de la turbine éolienne	32
Figure 13: modèle SIMULINK® de la turbine éolienne	33
Figure 14: Transmission mécanique	33
Figure 15: modèle Simulink® de la transmission mécanique.....	35
Figure 16: représentation de la génératrice synchrone dans le repère abc [37]	37
Figure 17: illustration de la f.é.m	38
Figure 18: schéma équivalent de la génératrice synchrone (a) dans le repère abc, (b) dans le repère dq, et (c) en grandeur réduite;.....	48
Figure 19: Modèle simple d'une turbine hydraulique	53
Figure 20: Réponse à un échelon du modèle simple d'une turbine hydraulique.....	53
Figure 21: Modèle non linéaire de la turbine hydraulique;.....	56
Figure 22: Contrôle de vitesse de la turbine.....	57
Figure 23: Modèle complet de la turbine hydraulique	57
Figure 24: Simulation de la turbine hydraulique.....	58

Figure 25: Modèle compact de la turbine hydraulique	59
Figure 26: schéma simplifié de la génératrice synchrone [46]	61
Figure 27: illustration des tensions perçues par les enroulements de la génératrice synchrone, dans le repère abc (à gauche) et dqo (à droite) [49].	63
Figure 28: schéma bloc du système d'excitation	68
Figure 29 : schéma bloc du système d'excitation	72
Figure 30: Vitesse du vent.....	74
Figure 31: Modèle complet du système hybride hydro-éolienne	2
Figure 32: Comportement courant tension pour des vents faibles	77
Figure 33: zoom sur la caractéristique courants et tensions	78
Figure 34: zoom illustratif de l'effet de la variation de charge	78
Figure 35: comportement de la puissance active pour des vents faibles.....	79
Figure 36: oscillations en début de simulation.....	80
Figure 37: zoom sur la variation des puissances à 2.5s.....	81
Figure 38: courbe des puissances réactives pour des vents faibles	81
Figure 39: comportement courant et tension avec le vent allant de 8 à 15m/s 82	
Figure 40: évolution de la puissance active pour des vents de 8 à 15m/s	83
Figure 41: évolution de la puissance réactive pour des vents de 8 à 15m/s	83
Figure 42: caractéristique courant et tension pour une vitesse de vent fixe... 84	
Figure 43: puissance active pour une vitesse de vent fixe	85
Figure 44: puissance réactive pour un vent de vitesse fixe	85
Figure 45: Courbe de tension et courant pour une charge de 250+150kw	86
Figure 46: zoom de la caractéristique tension.....	87
Figure 47: puissance active pur une charge de 250+150kw	87
Figure 48: puissance réactive pour une charge de 250 +150kw	88

Liste des tableaux

Tableau 1: Types d'éoliennes	11
Tableau 2: Avantages et inconvénients des différents types de génératrices	14
Tableau 3: Classification de la petite hydraulique	18
Tableau 4: caractéristiques de l'éolienne AERO E-82.....	27
Tableau 5: Données de l'éolienne.....	29
Tableau 6: Grandeurs de base pour la conversion en pu [38]	47

Liste des symboles

P		Probabilité de Weibull
V_v	m/s	Vitesse du vent
C_v, K_v		Facteur d'échelle et facteur de forme.
E_c	j	Énergie cinétique du vent
m	kg	Masse d'air
ρ_a	kg.m ³	Densité de l'air
S_t	m ²	Surface balayée par les pales de l'éolienne
P_v	kW	Puissance du vent
P_t	kW	Puissance extraite du vent
$C_p(\lambda)$		Coefficient de puissance
λ		Vitesse spécifique
Ω_t	rad/s	Vitesse de rotation de l'arbre de la turbine éolienne
R_t	m	Rayon de la turbine
C_t		Couple produit par la turbine éolienne
D_t		Coefficients de frottement mécaniques côté rotor
D_g		Coefficients de frottement mécaniques côté génératrice
G		Coefficient du multiplicateur de vitesse

η_{ig}		Rendement du multiplicateur de vitesse
C_{mec}		Couple mécanique de la génératrice
Ω_{mec}		Vitesse de rotation mécanique de la génératrice
C_{em}	Nm	Couple électromagnétique
E_c		Énergie cinétique du fluide
m	kg	Masse du fluide
v	m/s	Vitesse du fluide
E_p		Énergie potentielle du fluide
g	m/s ²	Accélération de la pesanteur
H	m	Hauteur de chute du fluide
E_{pr}		Énergie de pression du fluide
P	Pa	Pression du fluide
ρ	kg/m ³	Masse volumique du fluide
P_{hyd}		Puissance hydraulique nette
P_m		Puissance mécanique
T_ω		Constante de temps
C_ω	Nm	Couple mécanique
Ω_ω	rad/s	Vitesse de rotation de la turbine hydraulique

V_{ol}	m^3	Volume du fluide
Q	m^3/s	Débit du fluide
H	M	Hauteur nette de chute
β	rad	Angle de câblage
K_1		Gain statique de la transmission mécanique
T_1		Constante de temps de la transmission mécanique
ω_R	rad/s	Vitesse de rotation du rotor de la génératrice asynchrone
g		Le glissement
ω_{sync}	rad/s	Vitesse de synchronisation
ω_e	rad/s	Pulsation électrique
f	hz	Fréquence électrique
p		Nombre de paires pôles
R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}	Ω	Résistance des enroulements statoriques
R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}	Ω	Résistance des enroulements rotoriques
r ou R	Ω ou pu	Résistance
v ou V	V ou pu	Tension
i ou I	A ou pu	Courant
e	V	Force électromotrice
φ ou Ψ	Wb	Flux

$L_{..}$	H ou pu	Matrice des inductances
$l_{..}$	H ou pu	Inductance propre d'un enroulement
$m_{..}$	H ou pu	Inductance mutuelle entre deux enroulements
θ	rad	Angle entre enroulements statoriques et rotoriques
θ_a	rad	Angle mobile
ω_a	rad/s	Vitesse de rotation du référentiel mobile
X	Ω	Matrice de réactance
x	Ω	Réactance
P_a	W	Puissance active
Q_r	VAR	Puissance réactive
η_{hyd}		Rendement de la turbine hydraulique
K_v et K_p		Coefficient de proportionnalité.
G		ouverture de la conduite forcée
L	m	longueur de la conduite forcée
A	m ²	Aire l'une section de conduite forcée
T_ω	s	Contente de temps
H_s	m	Hauteur statique de la colonne d'eau
H_l	J/kg	Perte de charge due au frottement dans le conduit
β		Constance de proportionnalité de la déviation de vitesse

A_t		Gain de la turbine hydraulique
K_p, K_i et K_d		Les coefficients du contrôleur PID;
Ω_{ref} et Ω_e	rad/s	Vitesses de rotation nominale et réelle de la turbine.
k_a et t_a		Gain du contrôleur et constante de temps du cerveau-moteur
w_{ref}	pu	Vitesse de référence
w_e	pu	Vitesse instantanée de la machine;
P_{ref}	pu	Puissance mécanique de référence;
P_e	pu	Puissance électrique de la machine;
P_m	pu	Puissance mécanique à la sortie de la turbine;
C_r	Nm	Couple résistant de la charge.
J	kgm ²	Moment d'inertie du rotor de la génératrice synchrone.
f		Coefficient de frottement visqueux
R_e		Résistance des enroulements de l'excitatrice
N_e		Son nombre de spire;
σ		Coefficient de dispersion de l'excitatrice

Introduction générale

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il faut la produire, la transporter puis la distribuer aux consommateurs qui en plus d'être répartis sur de grandes distances, augmentent exponentiellement chaque année. En effet la croissance mondiale de la demande en énergie électrique est d'environ 2.1% [1] ce qui impose une augmentation de la production par la construction de nouvelles centrales de production afin de satisfaire cette demande. Ces nouvelles centrales ainsi construites sont généralement raccordées au réseau électrique existant afin que l'énergie disponible soit transportée vers les consommateurs finaux.

Dans le but de réduire leur impact environnemental, les producteurs d'énergie électrique se tournent depuis plusieurs années vers les sources d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, éolienne, biomasse, hydrolienne...) qui constituent une solution alternative aux énergies fossiles qui, en plus d'arriver à épuisement sont de grands pollueurs. Cependant, le caractère intermittent de ces nouvelles sources d'énergie, la saturation des réseaux de transport, les coûts liés à la construction de nouvelles lignes de transport, les problèmes de stabilité de l'interconnexion, et bien d'autres problèmes [2] poussent les producteurs à opter pour des microcentrales isolées souvent constituées d'une ou de plusieurs micro-sources pouvant fournir de l'énergie à une population locale ou à une industrie locale. L'une des étapes parmi les plus importantes dans un projet de construction d'une centrale électrique est la modélisation et la simulation numérique.

La modélisation consiste à mettre au point à l'aide d'équations mathématiques un modèle implémentable de façon reproductible et simulable. Les modèles élaborés servent ainsi à prédire les réactions dynamiques ou statiques du système en réponses à des stimuli connues. Ceci facilite la formulation des lois de

commandes pour palier à d'éventuelles contingences pouvant apparaître en fonctionnement réel.

Dans le présent document, nous effectuerons la modélisation et la simulation d'une microcentrale hybride hydro/éolienne isolée. En effet notre sujet de maîtrise vise à développer un système autonome biénergie : hydraulique et éolien. Ainsi nous proposons un modèle complet pour la simulation de ce système de production électrique hybride.

Dans la suite du présent mémoire, nous présentons une revue de littérature au chapitre 1 qui nous permettra par ailleurs de situer notre problématique dans le contexte scientifique actuel. Le système à modéliser sera ensuite présenté plus en détail dans le chapitre 2 en examinant chaque sous-système notamment sa constitution et son fonctionnement. Les chapitres 3 et 4 exposent la modélisation proprement dite. Les équations décrivant le fonctionnement de chaque sous-système y sont présentées. Enfin au chapitre 5 nous présenterons la mise en commun des différents blocs et la simulation de la microcentrale alimentant une charge locale.

Chapitre 1 : Contexte, problématique et état de l'art de l'étude

Introduction

Les réseaux électriques sont en pleine expansion avec la pénétration de nouvelles sources d'énergies dites renouvelables. L'organisation traditionnelle des systèmes électriques se voit donc bousculée par l'apparition croissante de la production décentralisée (provenant en général de sources d'énergies renouvelables). Le problème majeur associé aux sources d'énergie décentralisées est qu'elles ne participent pas au service système, ceci signifie qu'elles n'interviennent pas dans le réglage de la tension et de la fréquence du réseau comme c'est le cas pour les autres sources; leur taux de pénétration doit alors être limité afin de garantir la stabilité du réseau [3]. Raison pour laquelle les systèmes de production isolés sont de plus en plus implémentés.

1.1. Contexte et problématique

Au Canada, on dénombre des dizaines de communautés et de sites industriels isolés où vivent des milliers de Canadiens[4] alimentés en électricité par des groupes électrogènes diesel. La majorité de ces communautés étant nordiques et/ou côtières avec par conséquent un potentiel éolien important. Le Canada n'est pas le seul dans ces conditions, en Afrique en particulier et un peu partout sur les autres continents il existe des sites et des îles où l'acheminement de l'énergie électrique par transport habituel aurait un effet technicoéconomique non rentable; d'où la nécessité de la construction de micro-réseaux pour l'approvisionnement de ces sites qui jusqu'ici se contentaient des groupes électrogènes pour la plupart. Dans le contexte scientifique actuel, les énergies renouvelables se présentent comme la solution incontestable à cette situation et pour le remplacement des énergies fossiles qui s'épuisent [5].

Ces nouvelles sources de production connectées au réseau électrique existant sont à l'origine de nombreux problèmes tels que la pollution harmonique [6] du réseau et les instabilités liées aux fluctuations du renouvelable [7]. Pour ces raisons,

les producteurs optent aujourd'hui pour des sites isolés de petites ou microcentrales de production. Le caractère intermittent et fluctuant des sources renouvelables les rend peu fiables en termes de disponibilité de la ressource primaire. La solution est alors la mise en commun de deux ou plusieurs sources afin de garantir la disponibilité optimale de l'énergie. Ainsi, il revient à l'ingénieur d'effectuer toutes les études nécessaires afin de rendre possible le fonctionnement de ces sources en cogénération. Cela implique à la modélisation et à la simulation du système complet avant la réalisation physique de l'ouvrage. La problématique ou l'objectif identifié ici est de faire fonctionner simultanément (en cogénération) les sources de production, ceci revient en gros à, assurer le contrôle des flux d'énergie, ainsi que la commutation entre les sources en fonction de la disponibilité.

1.2. État de l'art sur les systèmes hybrides hydro/éolien

À l'exemple des bateaux à voiles et des moulins à vent, l'énergie du vent a longtemps été exploitée par l'homme pour faciliter son quotidien, mais il faudra attendre jusqu'au 19^e siècle vers les années 1880 pour avoir le premier aérogénérateur pouvant produire de l'électricité [8]. Dès lors la technologie n'a cessé de se performer afin d'optimiser son efficacité et son rendement. De nos jours, la pénétration des énergies renouvelables dans la production d'énergie électrique est de plus en plus croissante, l'éolienne n'en est pas épargnée [9]. Par exemple depuis 2008 en Europe, la capacité d'éoliennes installées est passée de 8.8GW à 17.1GW en 2017 [10] et il en est de même dans le reste du monde. d'ailleurs on prévoit et selon un scénario de croissance modeste une installation d'environ 1556GW d'ici 2050 [11], ce qui pourrait complètement éliminer les sources d'énergies les plus polluantes.

Tout comme l'énergie du vent, l'énergie de l'eau a été utilisée par l'homme depuis l'antiquité, principalement à travers les moulins à eau pour moulinier les céréales, irriguer les cultures ou élever les charges. C'est seulement vers la fin du 19^e siècle que cette énergie a pu être utilisée pour produire de l'électricité [12]. Depuis lors, l'hydroélectricité n'a cessé d'évoluer tant en puissance installée qu'en

rendement et en technologie [13]. La première centrale hydroélectrique installée était de l'ordre de quelques kilowatts avec une hauteur de chute de seulement quelques mètres. De nos jours, on dénombre plusieurs centrales avec des productions de plusieurs centaines de mégawatts rendu possible grâce à des hauteurs de chute de plusieurs centaines de mètres [14]. Ce qui permet à l'hydroélectricité d'atteindre un pourcentage de près de 18% de la production électrique mondiale et plus de 98% de la production électrique d'Hydro-Québec (hydroquebec.com). Elle est ainsi la source d'énergie renouvelable la plus significative dans le monde. Il existe à cet effet une multitude de modèles et de méthodes de contrôle commande, basée sur les équations mathématiques analytiques et dynamiques des éléments constitutifs du système de production.

L'association de 2 ou plusieurs sources d'énergies permet d'augmenter considérablement l'efficacité du système. Des études pointilleuses sont alors à effectuer afin de garantir le bon fonctionnement du micro-réseau ainsi constitué. On dénombre entre autres : la gestion du flux de puissance, la commutation des sources, la stabilité du système, l'optimisation du rendement et de l'efficacité énergétique. Il existe une multitude d'étude sur l'hybridation des systèmes de production d'énergie électrique. C'est ainsi qu'on retrouve des associations du type solaire – éolienne, solaire – hydraulique, éolienne – hydraulique et bien plus encore. Dans la littérature on constate que les associations sont toujours faite en fonction de la ressource primaire disponible. On prend par exemple ici le cas de Mohamed Mladjao Mouhammad Al Anfaf [15] qui étudie la contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges afin de desservir 3 régions française en énergie électrique. Il associe ici une l'éolienne et le photovoltaïque à cause du potentiel intéressant de ces sources dans ces régions. Les systèmes de production hybride tout comme les grands réseaux demande une supervision pointilleuse afin de garantir la continuité de service. Un superviseur est développé et présenté dans [16], ce dernier utilise les modèles dynamiques des

sources et des systèmes de stockages mais aussi la disponibilité sur le court terme de la ressource primaire pour générer une consigne qui sera envoyée à chaque élément du sous-système hybride, ceci permet de prédire le comportement du sous réseau en tout temps.

Une méthode de gestion de la stabilité du système hybride hydro/éolien, basée sur la minimisation de la charge par le contrôle de la puissance d'entrée du système est proposée dans la référence [17]. Dans cette méthode, la logique de contrôle commande tout ou rien (marche arrêt) permet alors de ressortir les fonctions de transfert simplifiées pour l'analyse de la stabilité. Certains nouveaux systèmes de génération éolienne hydroélectrique isolés utilisent deux générateurs synchrones à aimant permanent, l'un piloté par une éolienne à vitesse variable et l'autre entraîné par une turbine hydraulique à puissance constante [18]. Dans de tels systèmes, afin d'obtenir une meilleure efficacité du système hybride, on utilise des convertisseurs de source de tension à base de transistors bipolaires à transistors à grille isolée et à modulation de largeur d'impulsion dos à dos. On obtient ainsi un système capable de contrôler l'amplitude et la fréquence de la tension de charge. Le problème d'efficacité quant à lui est étudié dans la référence [19] afin de montrer que le couplage éolien/hydraulique permet de garantir la disponibilité de l'énergie pour le passage de la pointe hivernale. Il montre également que cette association aboutit à une efficacité plus importante que si les sources avaient été prises individuellement. D'autres études encore comme celles présentées dans la référence [20] mettent en exergue le fait que dans une cogénération l'une des sources peut jouer le rôle d'appoint tandis que l'autre est l'alimentation principale, ceci en mettant en commun une microcentrale hydroélectrique (source principale) à vitesse variable pilotée par une génératrice asynchrone à double alimentation et une microcentrale éolienne à vitesse fixe (source d'appoint). D'autres travaux se penchent plus sur les stratégies de contrôle commande des systèmes de production hybride afin de faciliter leur possible intégration au réseau, c'est le cas dans [21] qui modélise un système hydro/éolien et

utilise le système de stockage par pompage pour améliorer la qualité de la puissance envoyée au réseau.

1.3. Objectifs spécifiques et méthodologie

Le présent mémoire de maîtrise vise à développer un système autonome biénergie, hydraulique et éolien. Plus précisément, après avoir réalisé l'état de l'art dans le domaine de la modélisation et de la simulation hydroélectriques, éoliennes et hydro/éoliennes, on proposera un modèle complet de simulation d'un système de production hybride hydro/éolien en utilisant les modèles de simulation de la centrale hydroélectriques et éoliennes dont la documentation est disponible afin de proposer et simuler un modèle complet du système hybride. Ces modèles permettront de mieux comprendre et interpréter le fonctionnement du système afin de l'optimiser et ainsi réduire les coûts et les erreurs de conception. Ils pourront aussi permettre de faire plusieurs considérations de situations de fonctionnement en fonction de différents sites afin de déterminer le site le plus rentable du point de vue technico-économique.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs notions scientifiques seront appliquées, des outils mathématiques seront également utilisés ; on remarque à priori que notre système fera intervenir des notions de pneumatique, d'aérodynamique, de mécanique, d'électronique, d'électrotechnique et d'automatique, d'où la nécessité de modéliser et simuler le système avant la réalisation pour limiter les coûts d'investissement dans des essais réels. Vu la complexité que ces notions peuvent apporter, notre approche consistera donc à modéliser chaque sous-système séparément avant de faire la mise en commun pour obtenir le système complet, ceci permet de mieux contrôler localement les sous-systèmes pendant le fonctionnement réel. Cela étant, le comportement dynamique de chaque sous système sera représenté à l'aide d'équations mathématiques; les équations différentielles sont le plus souvent utilisées ici car elles tiennent compte de tous les états du système (transitoire et stationnaire), puis ces équations sont transformées en fonctions de transferts et/ou en modèles d'états pour l'intégration dans le logiciel MATLAB/SIMULINK® que nous

utiliserons pour l'implémentation virtuelle et la simulation. Afin d'alléger la charge du travail, on s'attardera beaucoup plus sur les notions électriques et des hypothèses simplificatrices seront appliquées à ces notion pour obtenir des modèles facilement implémentables.

Chapitre 2 : Présentation du système

Introduction

Le système étudié dans ce mémoire est constitué d'une éolienne fonctionnant en association avec une turbine hydraulique afin de garantir la disponibilité de l'énergie. Ce choix d'association est basé sur le fait que la ressource hydraulique ne varie généralement pas aussi rapidement que la vitesse du vent et les événements météorologiques exceptionnels pendant lesquels cette ressource varie sont prévisibles à partir des relevés météorologiques. Pour cela, la microcentrale hydraulique à vitesse variable pourra compléter efficacement une éolienne à vitesse variable [22].

2.1. L'éolienne

2.1.1. Principe

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. Les éoliennes utilisent l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre d'un rotor produisant ainsi une énergie mécanique qui sera transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Le couplage peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dans le cas contraire.

2.1.2. Types d'éolienne

Éoliennes à axe vertical : ces éoliennes ont été fabriquées et brevetées par l'ingénieur français George Darrieus. Comme son nom l'indique, l'éolienne de Darrieus possède un axe vertical et est formée de 2 ou 3 pales en forme de C. le fait de pouvoir placer la génératrice et le multiplicateur à terre élimine la nécessité de munir la machine d'une tour. De plus pas besoin d'un mécanisme d'orientation pour orienter le rotor dans la direction du vent. Cependant l'absence de tour oblige ces éoliennes à être relativement basse et donc ne peuvent pas atteindre certaines vitesses de fonctionnement, ce qui réduit considérablement leur efficacité globale; de plus

elles ne démarrent pas automatiquement (Ainsi, il faut les pousser au démarrage). Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.

Éoliennes à axe horizontal : Toutes les éoliennes commercialisées et raccordées au réseau ou non sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal. La finalité du rotor est évidemment de convertir le mouvement linéaire du vent en énergie rotative susceptible d'entraîner une génératrice. On a dans cette catégorie des éoliennes à 2, 3, 4 voire plusieurs pales; le système tripale étant le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou mono-pale. Ainsi, le coefficient de puissance augmente de 10 % en passant d'une pale à deux, de 3% en passant de deux à trois. Il existe de plus un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, plus, des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale. Nous utiliserons une éolienne à 3 pales dans ce travail. La figure ci-dessous donne un aperçu de ces deux grandes classes d'éolienne.



a



b

Figure 1: Types d'éoliennes; à axe horizontal (a) et à axe vertical (b) [23]

Le tableau suivant résume les avantages et inconvénients de ces deux types d'éolienne et justifie par la même occasion le choix d'une éolienne à axe horizontal pour notre travail.

Tableau 1: Types d'éoliennes

Type	Avantages	Inconvénients
Axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement de conversion d'énergie élevée - Antidémarrage possible - Rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents de grande vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation élevé - Nécessite une tour robuste - Nécessite de longs câbles
Axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût d'installation - Aisance de la maintenance - Aucun dispositif d'orientation de la turbine dans l'axe du vent nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement de conversion - Haute variation du couple mécanique et des forces sur les pales - Nécessite un dispositif de démarrage - Contrôle de vitesse et puissance limité

2.1.3. Constitution

Chaque éolienne est dimensionnée de manière à produire un maximum d'énergie dans les conditions locales. Il y a toujours une "vitesse de démarrage" correspondant au vent minimum nécessaire pour actionner le système. De même il y a une vitesse maximum du vent au-delà de laquelle l'éolienne est dimensionnée pour

s'arrêter. Différents procédés actifs (rotation des pales, freins mécaniques...) ou passifs (emploi de la turbulence et du "décrochage" des pales) sont utilisés pour stopper l'éolienne en cas de vents extrêmes.

Les pales : Considérées comme les capteurs d'énergie de l'éolienne, elles sont réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes dont dépend le rendement de la turbine. Ainsi : Le diamètre des pales (ou l'aire balayée par ces pales) est fonction de la puissance désirée; La largeur des pales intervient dans le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large; Le profil est fonction du couple désiré en fonctionnement; Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes.

Le moyeu : Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent).

L'arbre primaire : C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 - 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.

Le multiplicateur mécanique de vitesse : Il s'agit d'un engrenage mécanique qui permet d'adapter la vitesse de la turbine (généralement très faible) à celle de la génératrice qui requiert de très grande vitesse de fonctionnement. Un système mécanique de freinage permettant d'arrêter les pales du rotor pour des vitesses de vent trop faibles ou trop fortes est généralement associé à cette transmission mécanique. En d'autres termes, il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. En effet, la rotation des pales est trop lente et le couple est trop important pour être utilisé par la génératrice. Le

multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique.

Le système de refroidissement : Des refroidisseurs sont prévus pour le multiplicateur de vitesse qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre, et pour la génératrice. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Le refroidissement à huile est utilisé pour les multiplicateurs.

L'arbre de la génératrice ou arbre secondaire : Il entraîne la génératrice de l'éolienne et est équipé d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) qui limite la fréquence de rotation en cas de vent violent (d'autres dispositifs de sécurité peuvent être utilisés).

La génératrice électrique : Elle assure la production de l'énergie électrique. Sa puissance atteint 3 MW pour les grosses éoliennes. Elle peut être soit à courant continu et connecté au micro-réseau via un dispositif d'électronique de puissance, soit à courant alternatif. Dans ce dernier cas on utilise une machine synchrone ou asynchrone, à vitesse fixe ou à vitesse variable. Plusieurs configurations sont alors possibles; le choix d'une configuration étant fonction des caractéristiques du site, de la puissance à produire ainsi que des avantages et inconvénients de chaque type (voir Tableau 2). En raison de sa simplicité et de son coût relativement faible, nous utiliserons dans ce travail une génératrice asynchrone à cage d'écureuil.

Le système de contrôle électronique : Contrôle le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation. Il sert à gérer le démarrage, à régler le pas des pales, le freinage ainsi que l'orientation de la nacelle par rapport au vent.

Les outils de mesure du vent : Ils sont de deux types : une girouette pour en évaluer la direction et un anémomètre pour en mesurer la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande qui effectue les réglages de l'éolienne automatiquement.

Le système d'orientation de la nacelle est une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de la « verrouiller » dans l'axe du vent grâce à un frein.

La nacelle : contient les équipements qui produisent de l'électricité à partir de la rotation de l'axe du rotor, cette électricité est ensuite transportée jusqu'au sol grâce à des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Tableau 2: Avantages et inconvénients des différents types de génératrices

Type	Avantages	Inconvénients
Machine synchrone à aimant permanent ou à rotor bobiné.	Fournit une fréquence constante (stabilité)	Nécessite une régulation permanente de la vitesse
Machine asynchrone à cage d'écureuil	Faible coût de production et de maintenance; simple et robuste	Instabilité en tension et en fréquence en fonctionnement autonome
Machine asynchrone à double alimentation	Plus stable dans un fonctionnement à vitesse variable	Nécessite une excitation auxiliaire

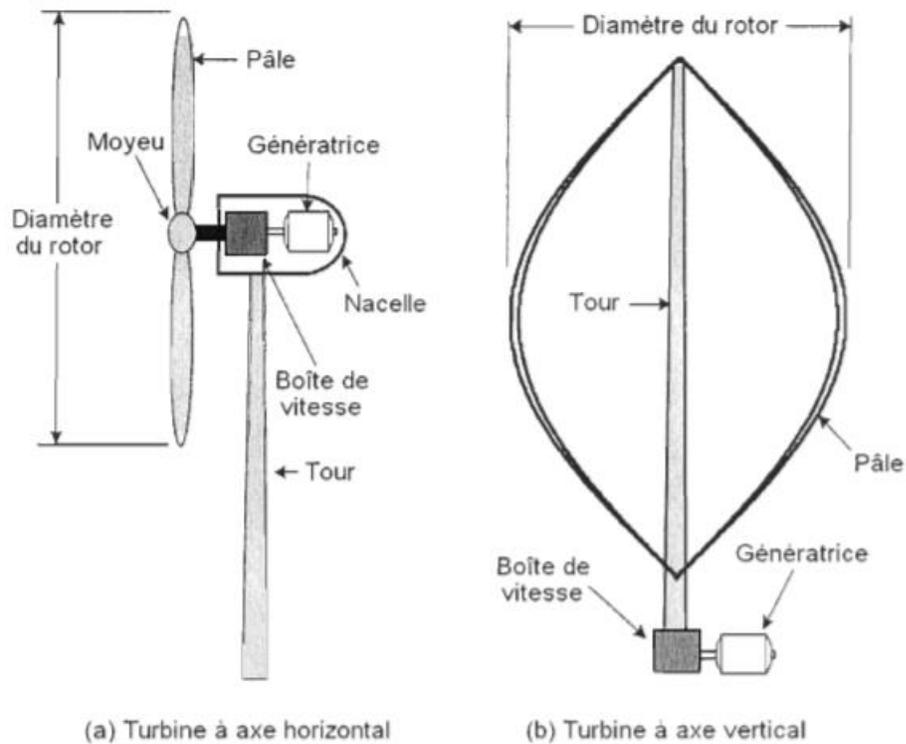


Figure 2: Les parties d'une éolienne [24]

2.1.4. La ressource primaire

L'ensoleillement inégale de la planète crée des dépressions à la surface de la terre et met les masses d'air en mouvement : c'est le vent. La vitesse du vent peut être très variable tout au long d'une période donnée; elle est influencée par la topologie du terrain, la hauteur au-dessus du sol, la météo, les saisons, l'heure dans la journée... Plusieurs méthodes sont utilisées pour modéliser la vitesse du vent et ses variations; parmi ces méthodes on a la modélisation par une série de Fourier et la modélisation par la distribution de Weibull [25] qui sont les plus utilisées.

La méthode par la distribution de Weibull possède un paramètre ou facteur de forme, propre à chaque site, traçant ainsi une courbe mathématique qui donne la probabilité que le vent souffle à une certaine vitesse. Il est nécessaire de tenir compte de cette distribution de probabilité pour calculer le potentiel énergétique éolien d'un

site donné afin d'optimiser le rendement des éoliennes et avoir une meilleure estimation de la rentabilité d'un site lors de la conception.

La distribution de la probabilité de Weibull est calculée grâce à la formule suivante :

$$P(V_v, C_v, K_v) = \frac{K_v}{C_v^{K_v}} V_v^{K_v-1} \cdot e^{-\left(\frac{V_v}{C_v}\right)^{K_v}} \quad (1)$$

V_v Est la vitesse du vent.

Avec C_v, K_v respectivement le facteur d'échelle et le facteur de forme de la distribution de Weibull, ce sont des paramètres déterminés pas l'analyse de l'historique des classes de vent sur un site donné.

On trouve ainsi la probabilité pour que le vent souffle à un endroit donné avec une vitesse donnée, cela nous permet pour des besoins de simulation d'avoir le profil du vent. La courbe ci-dessous présente la probabilité de Weibull pour une plage de vitesse allant de zéro à 25 m/s avec une vitesse moyenne de 8.86 m/s. elle a été tracée avec un facteur d'échèle de 10 et un facteur de forme de 2.

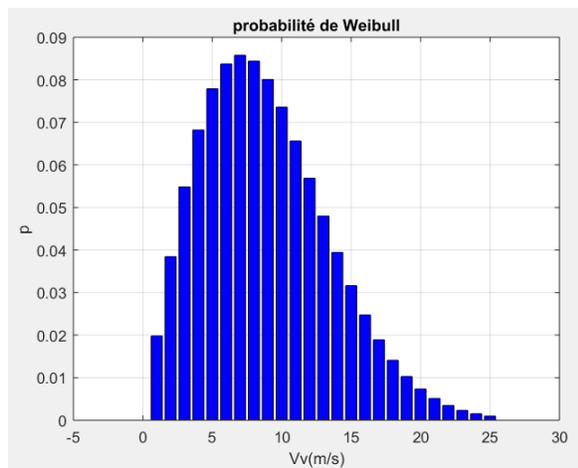


Figure 3: Distribution de Weibull

Une fois le potentiel éolien estimé et le site choisi, il convient de calculer la puissance fournie par le vent. L'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (2)$$

Avec m la masse de l'air interceptée par la surface formée par les pales de l'éolienne; elle est donnée par la formule :

$$m = \rho_a \cdot S_t \cdot V_v \quad (3)$$

Avec $\rho_a \approx 1.225 \text{ kg.m}^3$ la densité de l'air (varie légèrement en fonction de la température).

Et S_t la surface balayée par les pales de l'éolienne.

La puissance du vent qui parvient à la surface de la turbine éolienne est alors donnée par la formule :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (4)$$

Il s'agit ici de la ressource primaire disponible à l'entrée la turbine éolienne.

2.2. La partie hydraulique

2.2.1. Principe

L'hydroélectricité est possible grâce à la transformation de l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique; en effet, l'eau qui circule dans un cours d'eau possède une énergie cinétique, cette énergie est fonction du débit de l'eau et de l'inclinaison du cours d'eau par rapport à l'horizontale (hauteur de chute). Cette énergie peut alors être utilisée pour faire tourner une turbine couplée à son tour à une génératrice (alternateur) soit directement soit par le biais d'un multiplicateur de vitesse; c'est donc l'alternateur qui produit l'énergie électrique qui sera ensuite transportée pour l'alimentation des charges.

2.2.2. Les types de centrales hydroélectriques

On classe généralement les centrales hydroélectriques en fonction de leur puissance; on distingue alors les très grandes centrales de puissance supérieure à 200MW, les grandes centrales qui ont une puissance de 10 à 200 MW, les petites centrales pour une puissance comprise entre 2 MW et 10 MW, les minicentrales de puissance comprise entre 500 kW et 2 MW, les microcentrales avec une puissance comprise entre 20 kW et 500 kW, les pico-centrale pour une puissance inférieure à 20 kW. Il est à noter que ces niveaux de puissances ne sont pas fixes et peuvent varier d'un pays à l'autre ou d'une norme à l'autre. Les petites, mini et micros centraux ne représentent que 8.3% [26] de la production en énergie renouvelable mondiale mais peuvent être très bénéfiques quand il s'agit d'alimenter une charge isolée ou éloignée du réseau surtout si on considère leur rendement souvent supérieur à 80%. Celle qui nous intéresse dans ce travail est la microcentrale. On peut aussi faire une classification en fonction de la hauteur de chute, du débit du cours d'eau ou même de l'existence ou non d'un barrage de retenu.

Tableau 3: Classification de la petite hydraulique

Pays	Micro (kW)	Mini (kW)	Petite (MW)
USA	<100	100-1000	1-30
France	20-500	500-2000	2-10
Chine	5-5000	-	-

2.2.3. Constitution

Plusieurs éléments entrent dans la constitution d'une centrale hydroélectrique, les principaux sont indiqués sur la figure 6 il s'agit de :

Le barrage : il s'agit d'un ouvrage du génie civil de forme et de constitution étroitement liées à la géographie du site d'implantation du projet, construit pour retenir l'eau afin d'assurer la disponibilité de cette dernière; certaines centrales ne nécessitent pas de barrages, on parle alors de centrale au fil de l'eau mais à cause de

la variabilité du débit de l'eau au courant de l'année, il est conseillé de toujours prévoir un barrage de retenue d'eau.

La conduite forcée : elle achemine l'eau jusqu'à la turbine et est construite en acier ou en béton avec une grille à son entrée pour retenir les particules présentes dans l'eau; elle permet aussi de contrôler la quantité d'eau envoyée à la turbine en fonction de la production désirée.

La turbine : installée à la sortie de la conduite forcée, elle transforme le mouvement de translation de l'eau en mouvement de rotation transmise à la génératrice via un couplage sur l'arbre de celle-ci. On distingue plusieurs types de turbines (figure 4) : turbine Kaplan adaptée pour les ouvrages de faible hauteur de chute, turbine Pelton la plus souvent utilisée dans les aménagements de hautes chutes, la turbine Francis la plus utilisée grâce à sa flexibilité en termes de hauteur de chute, pour cette raison elle sera utilisée dans ce travail.

L'alternateur : il transforme l'énergie mécanique disponible sur son arbre en énergie électrique. On distingue la génératrice asynchrone à cage d'écureuil, la génératrice asynchrone à aimants permanents et la génératrice synchrone. Pour des installations isolées et de faible puissance comme il est le cas dans ce travail, on utilise généralement des génératrices synchrones à aimants permanents.

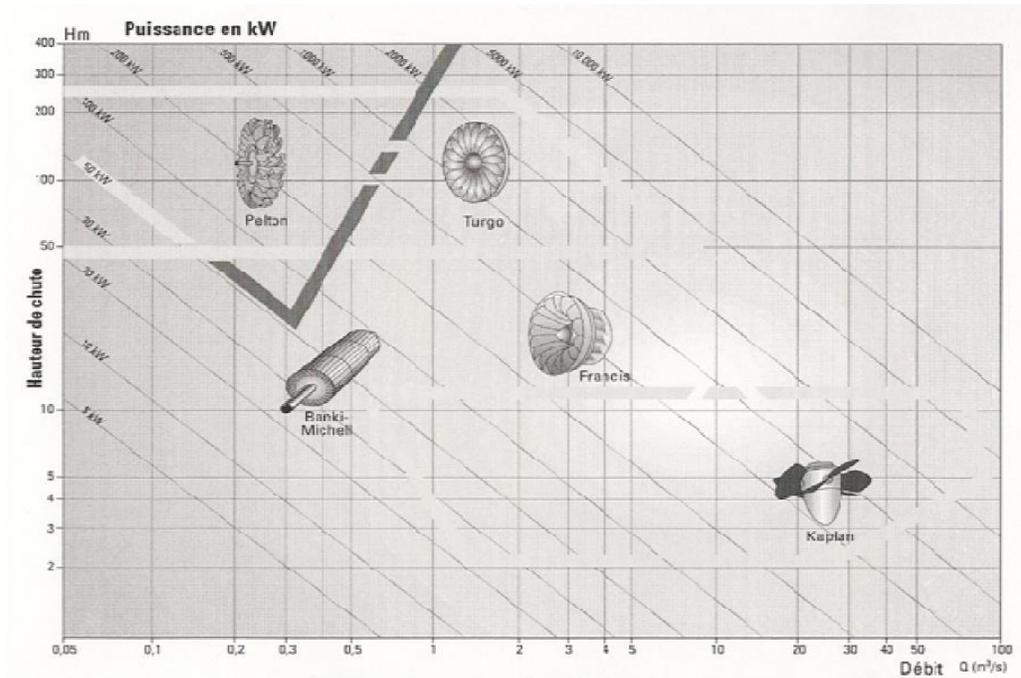


Figure 4: Types de turbines en fonction de la hauteur de chute [27]

L'excitatrice de la génératrice : pour une génératrice synchrone, elle est utilisée pour générer un champ magnétique statorique qui permettra d'induire le champ tournant du rotor permettant ainsi la régulation de la tension et de la puissance réactive ; elle joue aussi un rôle très important dans la commande, la régulation et la stabilisation afin d'assurer la protection des éléments dans le groupe turbine-alternateur [28]. Globalement il existe 3 types de systèmes d'excitation [29] :

- Les systèmes d'excitations statique (ST) : ici la bobine du rotor est alimentée directement à partir du réseau (sortie de la génératrice) via un transformateur puis un redresseur qui fournit alors le courant continu nécessaire à l'excitation de l'alternateur. Le contrôle de la tension s'effectue dans le pont de diodes qui peut régler l'amplitude de la tension de sortie. Bien qu'étant peu coûteux l'utilisation de balais collecteurs et la déformation du courant d'excitation dû à la présence de semi-conducteurs rend ce système peu utilisé de nos jours.

- Les systèmes d'excitations à courant alternatif (AC) : Ici une seconde machine synchrone est utilisée pour générer le courant d'excitation qui est redressé par un redresseur statique ou un redresseur tournant avant d'être fourni à l'alternateur. La machine secondaire est fabriquée à l'inverse de la génératrice, c'est-à-dire que l'inducteur (la partie qui génère le champ magnétique) se situe au stator et l'induit (la partie où on génère le courant) au rotor.
- Les systèmes d'excitation à courant continu (DC) : L'excitation est assurée par une machine à courant continu qui peut être montée sur l'arbre de la génératrice ou entraînée par un autre moteur. Son principal inconvénient est l'utilisation de bagues collectrices qui augmente la fréquence de maintenance même si l'absence de redresseurs nous permet d'avoir un meilleur courant d'excitation.

Les autres équipements électriques : installés dans le local électrique avec l'alternateur, il s'agit des différents systèmes de contrôle commande

On a également d'autres éléments comme **le canal de fuite** qui permet de restituer l'eau turbinée à la rivière, **l'évacuateur de crue** au niveau du barrage, **le passe à poissons....**

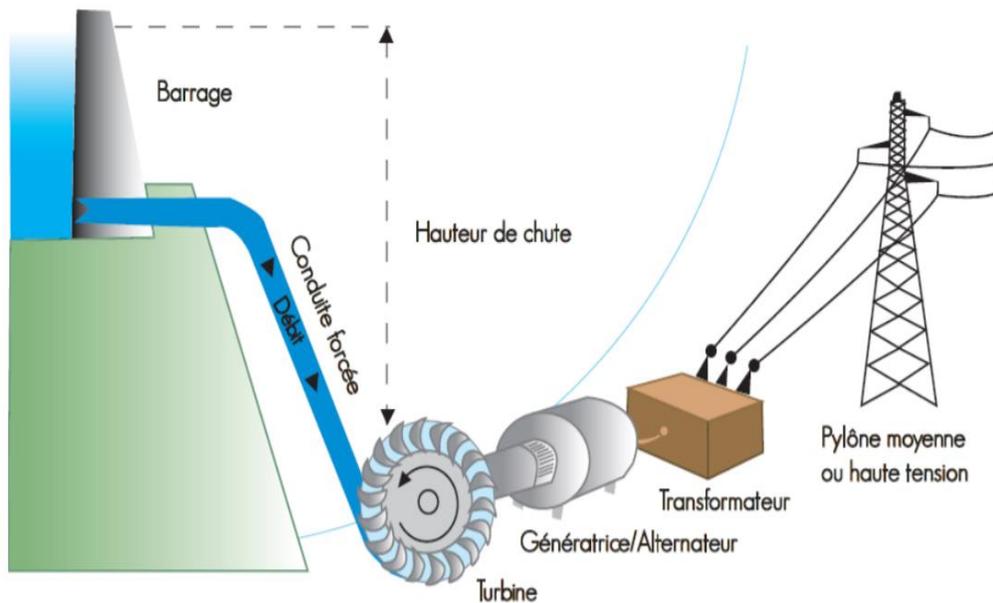


Figure 5: Constitution d'une centrale hydroélectrique

2.2.4. La ressource hydraulique

Elle est constituée de cours d'eau avec un débit et une hauteur de chute acceptable pour produire de l'énergie électrique, ce qui nous permet d'avoir une énergie cinétique, une énergie potentielle et une énergie de pression définies respectivement comme suit :

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (5)$$

$$E_p = mgh \quad (6)$$

$$E_{pr} = m \cdot \frac{p}{\rho_e} \quad (7)$$

La grandeur h est la hauteur brute, c'est la différence de hauteur entre le niveau d'eau dans le bassin supérieur et le niveau d'eau dans le canal de fuite.

m Est la masse de l'eau en kg

v La vitesse de l'eau m/s

g L'accélération de la pesanteur m/s²

P La pression de l'eau en Pa

ρ La masse volumique de l'eau en kg/m³

L'équation de Bernoulli nous permet de définir une autre grandeur H obtenue en déduisant les pertes de charges dans les conduits forcés; cette grandeur utilisée en hydraulique est définie tel que :

$$\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} + h.g + \frac{P}{\rho_e} = g.H \quad (8)$$

On en déduit alors la puissance hydraulique nette qui engendre une puissance mécanique calculée à partir du couple mécanique et la vitesse de rotation de la turbine et liée à la puissance hydraulique par le rendement hydraulique:

$$P_{hyd} = \frac{E}{t} = \frac{g.H.m}{t} = g.H \cdot \frac{m.V_{ol}}{V_{ol}.t} = \rho_e.g.H.Q \quad (9)$$

$$P_m = C_\omega \cdot \omega \quad (10)$$

$$\eta_{hyd} = \frac{P_m}{P_{hyd}} \quad (11)$$

La grandeur Q étant le débit maximum pouvant être turbiné par la centrale.

ω_t Est la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine hydraulique

H la hauteur de chute du fluide

P_{hyd} La puissance hydraulique nette

P_m La puissance mécanique extraite

C_ω Le couple mécanique

V_{oi} Le volume du fluide

2.3. Le système complet

Le système complet qui fait l'objet de ce travail se présente comme l'indique la figure ci-dessous il s'agit de l'association de l'éolienne et de la turbine hydraulique.

Les tensions de sortie des deux sous-systèmes seront choisies égales afin de faciliter le couplage au jeu de barre de distribution. Même si cette tension est différente de la tension de 25 kV qui est le niveau de tension la plus fréquente des réseaux MT au Québec (bien qu'il en existe d'autres) ceci ne posera aucune problématique car nous sommes dans un réseau isolé [30].

L'éolienne ici sera la source principale et prioritaire pour l'alimentation de la charge, l'hydraulique jouera donc le rôle d'appoint étant donné que la production éolienne varie beaucoup avec la vitesse du vent alors qu'on peut contrôler facilement la production hydraulique avec une petite retenue d'eau pour compléter le fait que le débit de l'eau varie moins que la vitesse du vent.

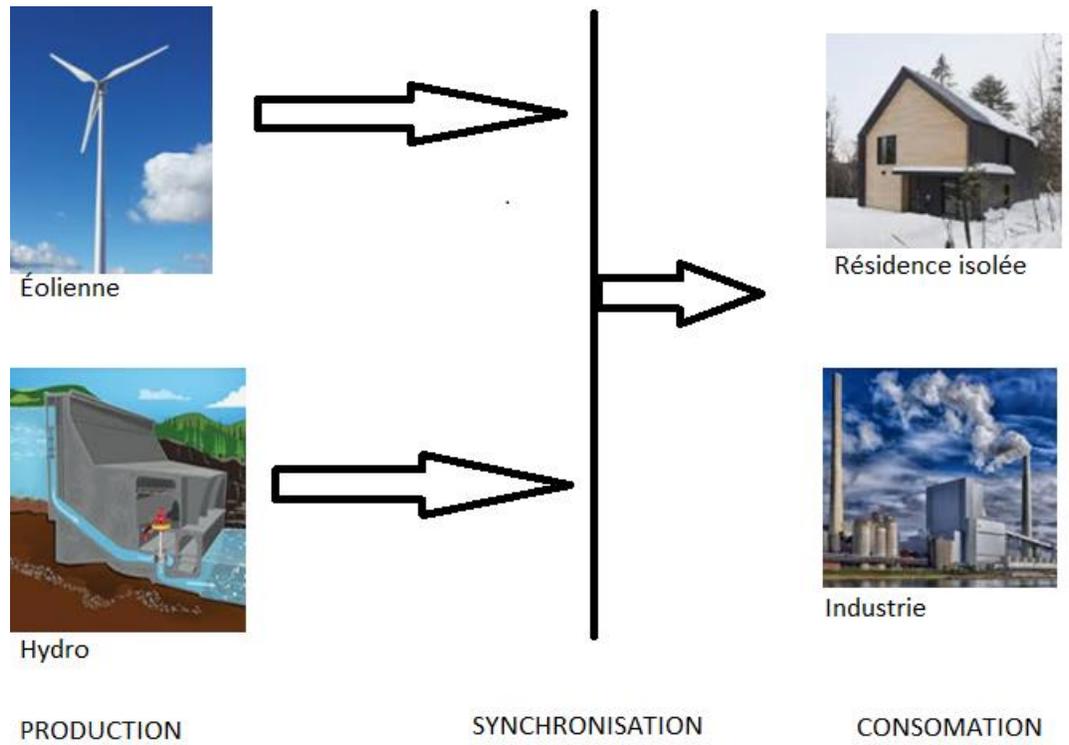


Figure 6: Système complet simplifié

Chapitre 3 : Modélisation de la partie éolienne

Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles des deux systèmes séparément et quelques simulations seront effectuées afin de vérifier le bon fonctionnement de chaque sous-système avant de procéder à la mise en commun de ces derniers.

Pour les besoins de simplification nous supposons les hypothèses suivantes :

- Les pales de l'éolienne vont être considérées à conception identique, cela signifie que les paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement sont identiques.
- On peut ignorer les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support en considérant que ceux-ci sont très faibles.
- On considère l'ensemble des pales comme un seul système mécanique en supposant la répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales.
- On suppose que la direction du vent est perpendiculaire aux pales de la turbine.
- L'effet de sillage provoqué par la tour (support) sur chaque pale est négligé.

3.1. Modèle de la turbine éolienne

La puissance contenue dans un vent qui souffle ne peut pas être entièrement transformée en puissance mécanique pour faire tourner l'éolienne. La puissance cinétique pouvant être récupérée d'un vent qui souffle à la vitesse V_v s'exprime par la formule [11] :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho_a \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{\Omega_r \cdot R_t}{V_v} \quad (12)$$

Où Ω_r est la vitesse de rotation du rotor de la turbine éolienne

λ La vitesse spécifique;

R_t Le rayon de la turbine éolienne;

C_p Définit le coefficient de puissance et il traduit la quantité de puissance cinétique que la turbine éolienne peut récupérer de la puissance du vent qui lui parvient, sa valeur maximale est de 0.5926 et est connu sous le nom de limite de Betz qui exprime la limite absolue de performance atteignable par une turbine éolienne (en pratique ce coefficient ne dépasse pas 0.45) [31]. Il existe plusieurs approximations mathématiques pour modéliser le coefficient de puissance, soit en fonction de la vitesse spécifique et de l'angle de câblage β tel que présenté à l'équation 13, soit uniquement en fonction de la vitesse spécifique (équation 14).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(116 * \frac{1}{\lambda_j} - 0.4 * \beta - 5 \right) * \exp\left(\frac{-21}{\lambda_j}\right) + 0.0068 * \lambda \quad (13)$$

$$\text{avec } \frac{1}{\lambda_j} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Pour des mesures de simplification on utilisera la formule en fonction de la vitesse spécifique en considérant un angle de câblage nul.

$$C_p(\lambda) = 0.44 \left(\frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad \text{avec } \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0.002} \quad (14)$$

La courbe ci-dessous est celle du coefficient de puissance de l'éolienne ``AERO E-82`` de Enercon dont les données sont contenues dans le tableau suivant (1):

Tableau 4: caractéristiques de l'éolienne AERO E-82

Aérogénérateur	AERO E-82
Puissance nominale	2 MW
Diamètre du rotor	82 m

Surface balayée	5281 m ²
Nombre de pales	3
Vitesse maximale de l'arbre du rotor	18 tours/minute
Vitesse minimale du vent	2 m/s
Vitesse nominale du vent	12.5 m/s

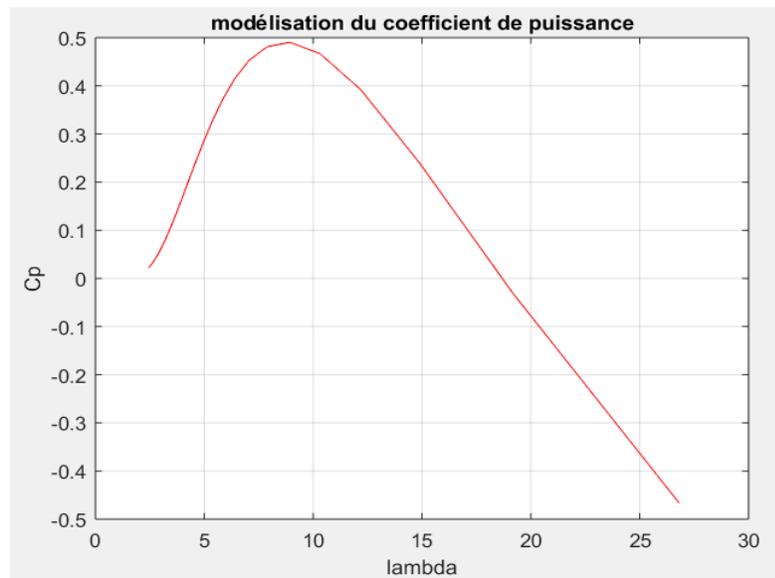


Figure 7: Modélisation du coefficient de puissance

La valeur maximale du coefficient de puissance correspond à la valeur maximale de puissance pouvant être extraite par la turbine éolienne pour une vitesse de vent donnée [32]. Chaque éolienne possède un coefficient de puissance unique à elle; la figure ci-dessous donne une vue des plages de coefficients de puissance en fonction des catégories et des types d'éolienne.

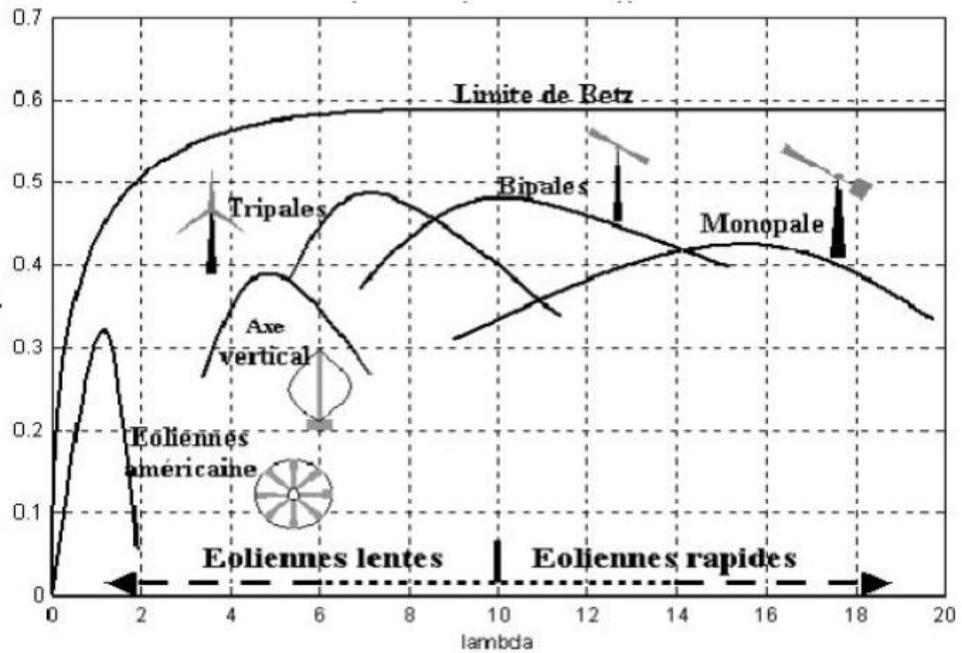


Figure 8: coefficients de puissance en fonction des types d'éolienne [33]

Tableau 5: Données de l'éolienne

Aérogénérateur	NM72c/1500
Puissance nominale	1500 kW
Diamètre du rotor	72 m
Surface balayée	4072 m ²
Densité de puissance	2.72 m ² /kW
Nombre de pales	3
Vitesse maximale de l'arbre du rotor	17.3 tours/minute
Vitesse minimale du vent	5 m/s
Vitesse nominale du vent	14 m/s
Vitesse maximale du vent	25 m/s
Nombre de rapport de la boîte de vitesse	2
Multiplicateur	88
Vitesse maximale du générateur	1518 tours/minute

De manière générale, la courbe de puissance d'une turbine éolienne est fournie par les constructeurs, il s'agit d'une courbe qui donne la puissance disponible à l'entrée de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent; elle permet alors d'évaluer aisément le coefficient de puissance pour la mise en œuvre de la turbine lors des travaux de dimensionnement. La figure ci-dessous représente la courbe de puissance d'une éolienne de type NM72c/1500 dont les caractéristiques sont disponibles dans le tableau 5 (2).

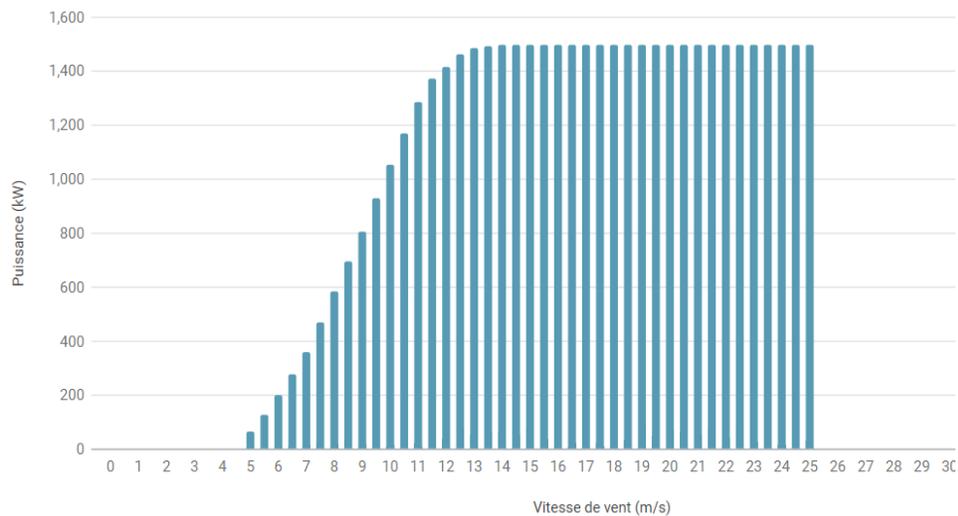


Figure 9: Courbe de puissance d'une éolienne

La puissance extraite du vent donnée par la formule 12 peut être représentée par la courbe ci-dessous où P_v est la puissance du vent et P_w la puissance extraite par la turbine éolienne :

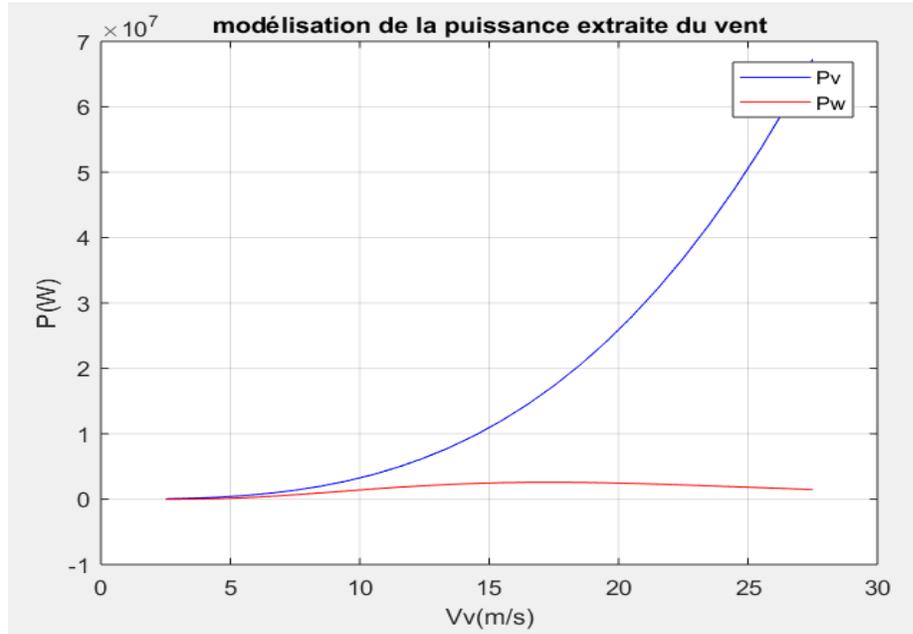


Figure 10: Modélisation de la puissance extraite du vent

On remarque ici que la puissance extraite du vent par la turbine éolienne suit fidèlement la puissance du vent pour des vitesses de vent faible ($V_v < 7 \text{ m/s}$), avant de s'en détacher pour atteindre un maximum vers $V_v = 17 \text{ m/s}$. Dans la pratique les éoliennes sont conçues pour s'arrêter automatiquement lors des vents trop fort c'est-à-dire au-delà de 25 m/s, ceci afin d'éviter la destruction de cette dernière.

Le rapport de variation entre la puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne, encore appelé coefficient de puissance est donné par la formule 13 la simulation étant représentée à la figure 7 ci-dessus.

La puissance mécanique ainsi extraite du vent sera ensuite transformée en un couple mécanique, et implémentée en suivant la formule suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho_a S_t V_v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (15)$$

C'est ce couple qui sera utilisé dans la suite pour les simulations.

On obtient alors le diagramme représentant le couple mécanique :

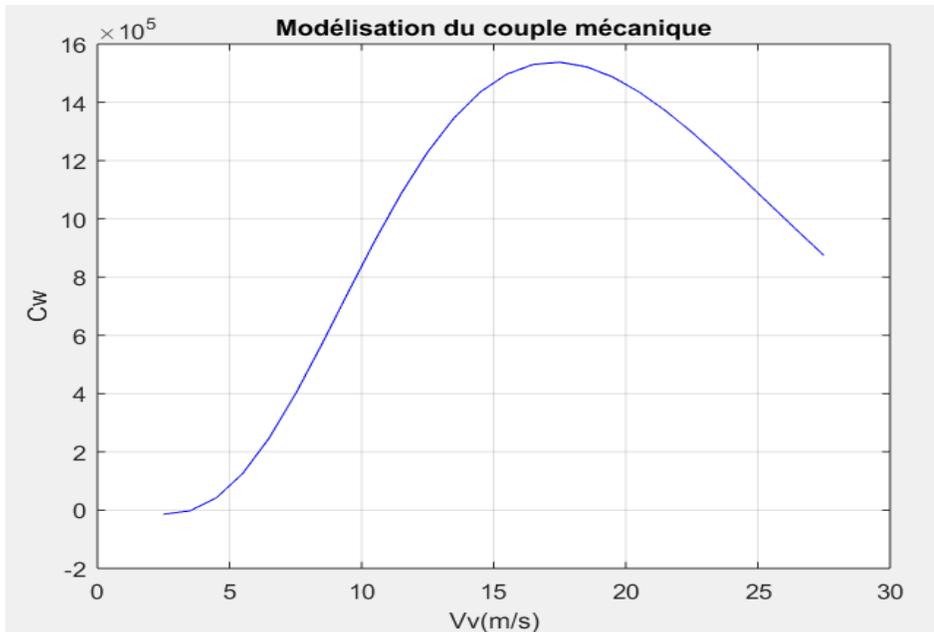


Figure 11: Modélisation du couple mécanique

On remarque bien que la valeur maximale du couple mécanique est atteinte pour la même vitesse de vent pour laquelle on obtenait la valeur maximale du coefficient de puissance et la valeur maximale de la puissance extraite du vent.

La turbine peut donc être représentée par le schéma bloc suivant :

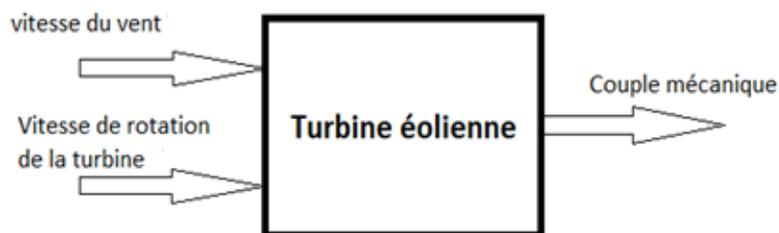


Figure 12: schéma bloc de la turbine éolienne

Le modèle Simulink du bloc turbine éolienne correspondant est donné par le schéma suivant; dans ce modèle, la vitesse du vent est représentée par un bloc prédéfini où on peut modifier les valeurs en fonction du profil du vent qu'on désire représenter:

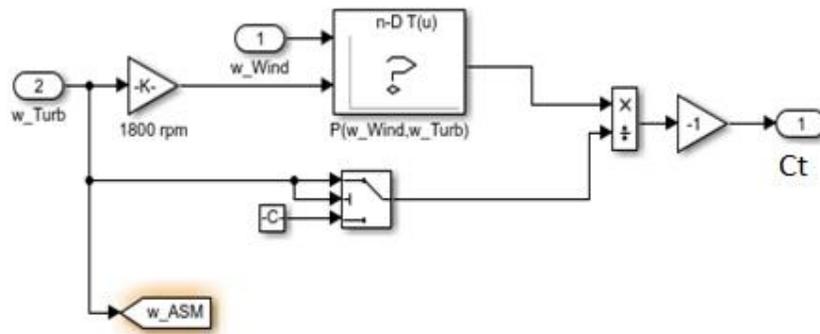


Figure 13: modèle SIMULINK® de la turbine éolienne

3.2. La transmission mécanique

Elle assure la liaison entre la turbine et la génératrice et est constituée d'un multiplicateur de vitesse qui adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. Les coefficients de frottements mécaniques sont alors définis par D_t côté rotor et D_g côté génératrice et identifiés tel que l'indique la figure ci-dessous [34] :

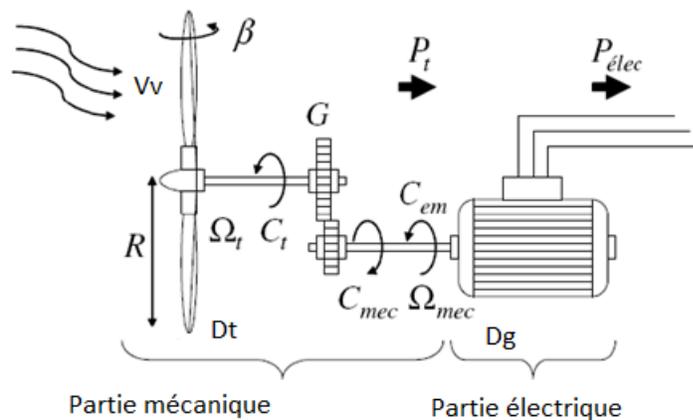


Figure 14: Transmission mécanique

La vitesse de rotation de la génératrice est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{mec} = \eta_{tg} \cdot G \cdot \Omega_t \quad (16)$$

Où G est le coefficient du multiplicateur de vitesse et η_{tg} son rendement.

On écrit alors le couple électromécanique comme :

$$C_{mec} = \frac{P_t}{\Omega_{mec}} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho_a S_t V_v^3 \frac{1}{\Omega_{mec}} \quad (17)$$

Équation dynamique de l'arbre de la turbine

Par simplification on considère généralement les frottements au niveau de la turbine nuls en supposant alors que la puissance mécanique à la sortie de la turbine est entièrement transmise au multiplicateur et ensuite à la génératrice c'est-à-dire $\eta_{tg} = 1$ [35]. on admet également un couplage rigide entre les éléments mécaniques tournants, ce qui nous permet, en reportant les deux arbres à la même base de puissance, d'écrire les équations dynamiques des parties tournantes en pu comme suit [36]:

$$J_{\Delta} \frac{d\Omega_t}{dt} = C_t - C_{em} - D_T \cdot \Omega_t \quad (18)$$

Avec J_{Δ} l'inertie totale du système et $D_T = D_t + D_g$ le coefficient de frottement total;

C_{em} Étant le couple électromagnétique.

Cette équation est rendue possible car en p.u on peut écrire :

$$\begin{aligned} (\Omega_t)_{pu} &= (\Omega_{mec})_{pu} \\ (C_t)_{pu} &= (C_{mec})_{pu} \end{aligned} \quad (19)$$

On effectue la transformée de Laplace de cette équation afin d'obtenir une fonction de transfert implémentable dans MATLAB, on a alors :

$$\Omega_t(s) = \frac{C_t(s) - C_{em}(s)}{D_T + J_{\Delta} \cdot s} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{mec}(s) &= \frac{C_{mec}(s) - C_{em}(s)}{D_T + J_{\Delta} \cdot s} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{J_{\Delta}}{D_T} \cdot s} (C_{mec}(s) - C_{em}(s)) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Omega_{mec}(s) = \frac{K_1}{1 + T_1 \cdot s} (C_{mec}(s) - C_{em}(s)) \quad (22)$$

Avec $K_1 = \frac{1}{D_T}$ Le gain statique de la transmission mécanique;

Et $T_1 = \frac{J_{\Delta}}{D_T}$ Sa constante de temps.

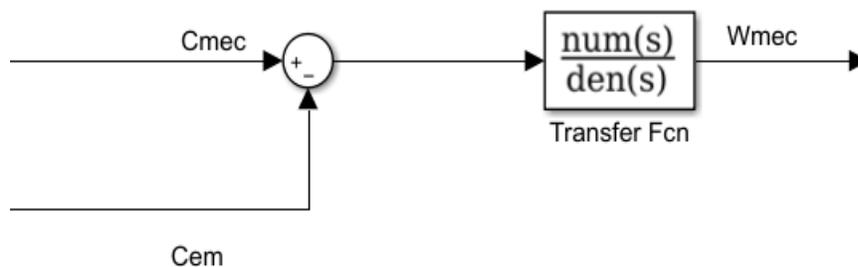


Figure 15: modèle Simulink® de la transmission mécanique

3.3. La génératrice asynchrone

Elle est constituée d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile) qui tourne à l'intérieur du stator. L'absence de contacts électrique par balais-collecteurs

rend la structure de cette machine simple, robuste et facile à construire. Le stator est constitué d'une carcasse métallique (généralement de l'acier) formée d'un empilement identique de tôles pour constituer un cylindre vide; l'intérieur de ce cylindre est parsemé d'encoche pour accueillir les enroulements statoriques triphasés séparés entre eux d'un angle de 120 degrés et dont les bornes constituent la sortie (pour alimenter les charges) de la génératrice asynchrone. Séparé du stator par l'entrefer, le rotor est constitué d'un matériau identique à celui du stator et peut être bobiné ou à cage; ce dernier qui est celui utilisé dans ce travail est fait de barres de cuivre et/ou d'aluminium court-circuités à leurs extrémités par des anneaux de même nature prenant ainsi l'allure d'une cage d'écureuil qui peut être vu comme un ensemble de 3 enroulements séparés entre eux par un angle de 120 degrés et tournant par rapport au stator.

La génératrice asynchrone est caractérisée par la différence de vitesse entre le rotor et le champ tournant (équation 23), ce dernier associé à la force électromotrice établit le lien entre le rotor et le stator à travers l'entrefer; le circuit électromagnétique ainsi constitué est alors représenté de façon simplifiée par un ensemble de résistances, d'inductances de fuite et d'inductances mutuelles.

$$\omega_R = (1 - g) \omega_{sync} \quad (23)$$

Avec $g < 0$ le glissement qui est fonction de la puissance que produit la génératrice a un moment donné ;

Et ω_{sync} la vitesse de synchronisation qui est fonction de la pulsation électrique ($\omega_e = 2\pi f$, f étant la fréquence des courants) des tensions statoriques et du nombre de paires pôles p de la machine.

$$\omega_{sync} = \frac{\omega_e}{p} \quad (24)$$

La vitesse de rotation du rotor s'écrit alors :

$$\omega_R = \frac{1-g}{p} \cdot \omega_e \quad (25)$$

La modélisation de la génératrice asynchrone est alors basée sur des équations mécaniques, magnétiques et électriques des enroulements statorique et rotorique; afin d'alléger le modèle de notre génératrice, nous ferons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose le circuit magnétique parfait en négligeant le courant de Foucault;
- La densité du courant est uniforme dans toute la section d'un conducteur;
- La symétrie des bobines statorique est considéré parfaite et identique.

Équations électriques et magnétiques

On écrit alors les résistances : au stator $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$ et au rotor $R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$, ce qui nous permet en suivant la représentation de la figure ci-dessous, d'écrire les équations électriques de la génératrice comme suit :

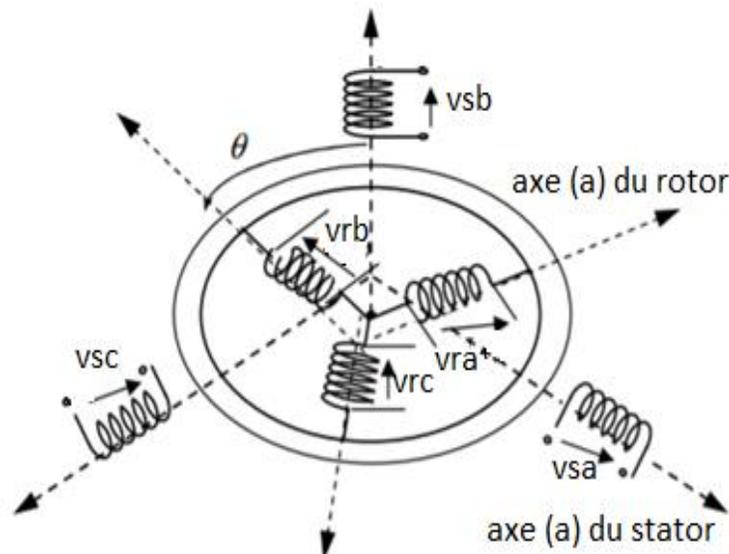


Figure 16: représentation de la génératrice synchrone dans le repère abc [37]

Chaque enroulement de la machine est le siège d'une f.é.m induite traduisant la loi de Faraday (un conducteur électrique placé dans un champ magnétique à flux

variable sera le siège d'une f.é.m proportionnelle à la variation du flux) illustrée par la figure 17 et donnée par l'équation 26.

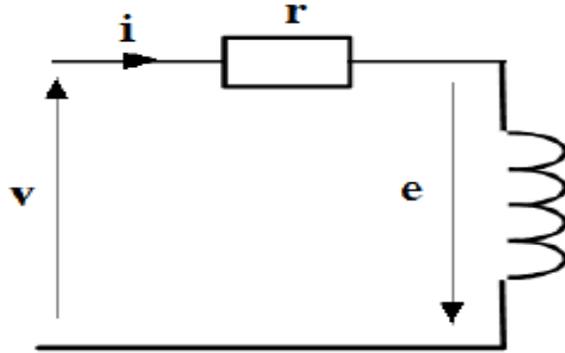


Figure 17: illustration de la f.é.m

$$v = r * i - e \quad (26)$$

Avec :

$$e(t) = - \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (27)$$

Soit alors :

$$v = r * i + \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (28)$$

La loi de maille appliquée à chaque enroulement nous permet alors d'écrire les équations des tensions au stator et au rotor:

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Par ailleurs les enroulements rotoriques étant court-circuités (rotor à cage d'écureuil), toutes les tensions y sont nulles; on a alors :

$$\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Soit alors :

$$\begin{bmatrix} v_s^{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & O_{33} \\ O_{33} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_s^{abc} \\ \varphi_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Les flux au stator et au rotor peuvent être écrites en fonction du courant par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \varphi_s^{abc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} + L_{sr}^{abc} \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \varphi_r^{abc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} + L_{rs}^{abc} \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

Avec L_{ss}^{abc} la matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques;

L_{rr}^{abc} La matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques;

L_{rs}^{abc} et L_{sr}^{abc} Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statorique et rotoriques;

Ce qui peut être écrit de manière détaillée comme suit en faisant intervenir les inductances [38]:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aA}(\theta) & L_{aB}(\theta) & L_{aC}(\theta) \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bA}(\theta) & L_{bB}(\theta) & L_{bC}(\theta) \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cA}(\theta) & L_{cB}(\theta) & L_{cC}(\theta) \\ L_{Aa}(\theta) & L_{Ab}(\theta) & L_{Ac}(\theta) & L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{Ba}(\theta) & L_{Bb}(\theta) & L_{Bc}(\theta) & L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{Ca}(\theta) & L_{Cb}(\theta) & L_{Cc}(\theta) & L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (34)$$

D'après les hypothèses simplificatrices, les enroulements statoriques sont identiques et les enroulements rotoriques aussi; de plus les enroulements au stator sont séparés entre eux par la même distance et par le même angle, il en est de même pour les enroulements au rotor; l'expression précédente se réduit alors à :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s^{abc} \\ \varphi_r^{abc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & (L_{sr}^{abc}(\theta)) \\ (L_{rs}^{abc}(\theta)) & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Où :

L_{ss}^{abc} Représente l'inductance propre des enroulements du stator;

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_a + L_{sso} & -\frac{L_{sso}}{2} & -\frac{L_{sso}}{2} \\ -\frac{L_{sso}}{2} & L_a + L_{sso} & -\frac{L_{sso}}{2} \\ -\frac{L_{sso}}{2} & -\frac{L_{sso}}{2} & L_a + L_{sso} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (36)$$

l_s : inductance propre d'un enroulement statorique;

m_s : inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques;

L_{rr}^{abc} L'inductance propre des enroulements du rotor;

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_a + L_{rro} & -\frac{L_{rro}}{2} & -\frac{L_{rro}}{2} \\ -\frac{L_{rro}}{2} & L_a + L_{rro} & -\frac{L_{rro}}{2} \\ -\frac{L_{rro}}{2} & -\frac{L_{rro}}{2} & L_a + L_{rro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (37)$$

l_r : inductance propre d'un enroulement rotorique;

m_r : inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques;

$(L_{sr}^{abc}(\theta))$ L'inductance mutuelle engendrée par l'influence du flux statorique sur les enroulements du rotor; $(L_{rs}^{abc}(\theta)) = (L_{sr}^{abc}(\theta))^T$

$(L_{sr}^{abc}(\theta))$ L'inductance mutuelle engendrée par l'influence du flux rotorique sur les enroulements du stator;

$$(L_{sr}^{abc}(\theta)) = \begin{bmatrix} L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos(\theta) & L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (38)$$

L_m Étant l'inductance maximale entre un enroulement statorique et un enroulement rotorique.

On écrit alors les expressions correspondantes des tensions au stator et au rotor et remplaçant le flux par son expression :

$$\begin{aligned} [v_s^{abc}] &= [R_s][i_s^{abc}] + [L_{ss}^{abc}] \frac{d}{dt}[i_s^{abc}] + [L_{sr}^{abc}] \frac{d}{dt}[i_r^{abc}] \\ 0 &= [R_r][i_r^{abc}] + [L_{rr}^{abc}] \frac{d}{dt}[i_r^{abc}] + [L_{rs}^{abc}] \frac{d}{dt}[i_s^{abc}] \end{aligned} \quad (39)$$

La puissance instantanée revient à la puissance vue du stator de façon à corroborer le fait que les tensions rotoriques sont nulles (rotor en cage); on écrit alors :

$$P_s^{abc} = v_s^a i_s^a + v_s^b i_s^b + v_s^c i_s^c \quad (40)$$

Équations de la génératrice dans le repère de Park

Les deux expressions de l'équation 39 constituent des équations différentielles à coefficients variables dépendant du temps, elles sont donc non linéaires. Cette situation rend très difficile l'exploitation de ces équations dans l'étude du comportement de la machine. Alors, il est nécessaire de les transformer à des équations différentielles à coefficients constants. Dans un souci de simplification nous allons effectuer la transformée de Park qui permet de passer d'un repère triphasé fixe à un repère diphasé mobile, comme l'indique l'équation 40; mais aussi cette transformation nous permettra d'avoir des équations pouvant être utilisées dans les simulations des blocs MATLAB/SIMULINK[®] qui fonctionnent avec des équations dans le repère de Park et qui produisent des résultats plus précis.

Nous faisons alors les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose une parfaite symétrie de construction ;
- La cage d'écureuil est assimilée à un bobinage en court-circuit avec le même nombre de phases que le stator ;
- La saturation magnétique est négligée ;
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est sinusoïdale;
- La composante homopolaire des signaux est nulle.

Cela étant, supposons un référentiel lié au rotor et tournant à la même vitesse ω_a que ce dernier, on définit les grandeurs suivantes : l'angle mobile est donné par $\theta_a = \omega_a t$; il s'agit de l'angle entre l'axe directe d et l'axe de référence dans le

système triphasé. Il revient à l'angle $\theta_s = \omega_s t$ entre l'axe a du stator et l'axe d pour les grandeurs statoriques et à l'angle $\theta_r = \omega_r t$ entre l'axe a du rotor et l'axe d pour les grandeurs rotoriques. Soit $\omega_a = \omega_r - \omega_s$.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (41)$$

[P] Étant la matrice de Park définie comme suit :

$$P^{-1}(\theta_a) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & -\sin(\theta_a) & 1 \\ \cos\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$P(\theta_a) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Cette transformée nous permet alors d'écrire les équation de la machine dans un repère bipolaire sans tenir compte de l'axe homopolaire pour des raisons de simplification; on a alors [39] :

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ v_s^q \\ v_r^d \\ v_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_a^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_s^q \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_s^d \\ \varphi_s^q \\ \varphi_r^d \\ \varphi_r^q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_s^d \\ \varphi_s^q \\ \varphi_r^d \\ \varphi_r^q \end{bmatrix} \quad (44)$$

Avec :

i_s^d, i_s^q, v_s^d et v_s^q : courants et tensions statoriques dans le repère de Park suivant les axes d et q;

i_r^d, i_r^q, v_r^d et v_r^q : courants et tensions rotoriques dans le repère de Park suivant les axes d et q;

$\varphi_s^d, \varphi_s^q, \varphi_r^d$ et φ_r^q : flux statorique et rotorique dans les axes d et q donnés par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s^d \\ \varphi_s^q \\ \varphi_r^d \\ \varphi_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_q & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_d & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_s^q \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \quad (45)$$

Avec :

L_d : inductance propre d'axe d;

L_q : inductance propre d'axe q;

L_m : inductance mutuelle.

On peut encore écrire ces équations sous la forme suivante en sachant que les tensions rotoriques sont nulles, on a alors:

$$\begin{bmatrix} V_s^{dq} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0_{33} \\ 0_{33} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{dq} \\ I_r^{dq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s^{dq} \\ \psi_r^{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J\omega_r & 0_{33} \\ 0_{33} & J\omega_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s^{dq} \\ \psi_r^{dq} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_s^{dq} \\ \psi_r^{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{rs} \\ L_{sr} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{dq} \\ I_r^{dq} \end{bmatrix} \quad (47)$$

En posant :

$$\begin{aligned}
R_s &= \begin{bmatrix} R_a^s & 0 \\ 0 & R_a^s \end{bmatrix}; & R_r &= \begin{bmatrix} R_a^r & 0 \\ 0 & R_a^r \end{bmatrix}; \\
L_{ss}^{dq} &= \begin{bmatrix} L_d^s & 0 \\ 0 & L_q^s \end{bmatrix} & L_{rr}^{dq} &= \begin{bmatrix} L_d^r & 0 \\ 0 & L_q^r \end{bmatrix}; \\
J &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} & L_{sr}^{dq} &= \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} = L_{rs}^{dq}
\end{aligned} \tag{48}$$

Avec :

L_{ss}^{dq} : inductance cyclique propre statorique;

L_{rr}^{dq} : inductance cyclique propre rotorique;

L_{sr}^{dq} et L_{rs}^{dq} : les mutuelles cycliques.

On peut les écrire en fonction des inductances propres et mutuelles grâce aux formules :

$$\begin{aligned}
L_{ss}^{dq} &= l_s - m_s \\
L_{rr}^{dq} &= l_r - m_r \\
L_{sr}^{dq} &= L_{rs}^{dq} = \frac{3}{2} l_m
\end{aligned} \tag{49}$$

On peut écrire les courants rotoriques en fonctions des courants statoriques et du flux en partant de l'équation 45, on a alors :

$$\begin{cases} i_r^d = \frac{1}{L_d} (\varphi_r^d - L_m i_s^d) \\ i_r^q = \frac{1}{L_q} (\varphi_r^q - L_m i_s^q) \end{cases} \tag{50}$$

La puissance instantanée quant à elle s'écrit comme suit dans le repère dq :

$$p_s^{dq} = \frac{3}{2} (v_s^d i_s^d + v_s^q i_s^q) \tag{51}$$

On remplace les tensions v_s^d et v_s^q par leurs valeurs données à l'équation 44 et on obtient l'équation 52 ci-dessous :

$$p_s^{dq} = \frac{3}{2} \left[\left(R_a^s i_s^d + \frac{d\varphi_s^d}{dt} - \omega_s \varphi_s^q \right) i_s^d + \left(R_a^s i_s^q + \frac{d\varphi_s^q}{dt} + \omega_s \varphi_s^d \right) i_s^q \right] \quad (52)$$

En développant et en regroupant convenablement les expressions de cette équation, on obtient une expression qu'on peut faire correspondre facilement avec les différents groupes de puissances qui caractérisent une génératrice asynchrone à cage d'écureuil:

$$p_s^{dq} = \frac{3}{2} \left[\left(R_a^s i_s^{d^2} + R_a^s i_s^{q^2} \right) + \left(\frac{d\varphi_s^d}{dt} i_s^d + \frac{d\varphi_s^q}{dt} i_s^q \right) + \omega_s \left(\varphi_s^d i_s^d - \varphi_s^q i_s^q \right) \right] \quad (53)$$

Il s'agit de :

- La puissance dissipée par échauffement ou encore pertes joule dans le stator de la génératrice;
- La puissance électromagnétique que les éléments ferromagnétiques du stator emmagasinent en fonction du temps;
- La puissance électrique proprement dite qui sera transformée en puissance mécanique dans le générateur.

Par ailleurs, les puissances qui nous intéressent et qui seront disponibles à la sortie de la génératrice sont les puissances active et réactive qui peuvent être données par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} P_a = v_s^d i_s^d + v_s^q i_s^q \\ Q_r = v_s^d i_s^d - v_s^q i_s^q \end{cases} \quad (54)$$

À cette étape, il convient d'écrire ces équations en grandeur réduite (pu), on utilisera à cet effet le tableau suivant :

Tableau 6: Grandeurs de base pour la conversion en pu [38]

Grandeurs	Grandeurs de base	Unité
Tension	$V_{sb} = \sqrt{2}V_N$	[V]
Courant	$I_{sb} = \sqrt{2}I_N$	[A]
Puissance	$S_{sb} = 3V_N I_N$	[VA]
Impédance	$Z_{sb} = \frac{V_{sb}}{I_{sb}}$	[Ω]
Inductance	$L_{sb} = \frac{Z_{sb}}{\omega_b}$	[H]
Flux	$\psi_{sb} = \frac{V_{sb}}{\omega_b}$	[Wb]
Pulsation	$\omega_b = 2\pi f_b$	[s ⁻¹]
Vitesse angulaire	$\omega_{Rb} = \frac{\omega_b}{P_p}$	[rad.s ⁻¹]
Couple	$T_b = \frac{S_b}{\Omega_b}$	[Nm]
Dérivé par rapport au temps	$\frac{d}{dt} \xrightarrow{pu} \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt}$	

D'Après les hypothèses simplificatrices, on peut écrire les réactances propres d'axe dq ou encore réactances statoriques et rotoriques comme suit :

$$\begin{aligned} x_d &= x_q = x_s \\ x_D &= x_Q = x_r \end{aligned} \quad (55)$$

On en déduit alors les équations de flux et de tension comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_s^{dq} \\ V_r^{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0_{33} \\ 0_{33} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{dq} \\ I_r^{dq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s^{dq} \\ \psi_r^{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J\omega_s & 0_{33} \\ 0_{33} & J\omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s^{dq} \\ \psi_r^{dq} \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_s^{dq} \\ \Psi_r^{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & X_{sr} \\ X_{sr} & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^{dq} \\ I_r^{dq} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Avec :

$$\begin{aligned} X_{ss}^{dq} &= \begin{bmatrix} x_d & 0 \\ 0 & x_q \end{bmatrix}; \\ X_{rr}^{dq} &= \begin{bmatrix} x_D & 0 \\ 0 & x_Q \end{bmatrix}; \\ X_{sr}^{dq} &= \begin{bmatrix} x_m & 0 \\ 0 & x_m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (58)$$

x_m Étant la réactance mutuelle.

Ces transformations (du repère abc au repère dq et enfin en pu) peuvent être représentées par le schéma suivant :

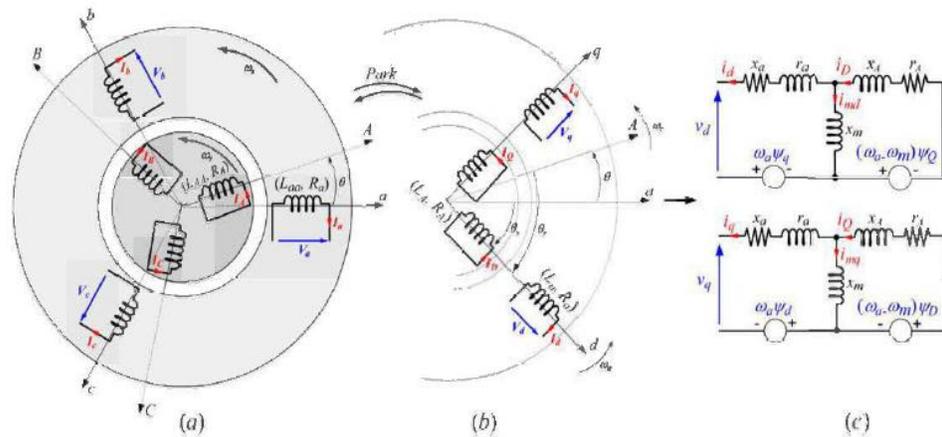


Figure 18: schéma équivalent de la génératrice synchrone (a) dans le repère abc, (b) dans le repère dq, et (c) en grandeur réduite;

L'équation 44 peut encore s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \Psi_s^d = -X_{ss} I_s^d + X_{sr} I_r^d \\ \Psi_s^q = -X_{ss} I_s^q + X_{sr} I_r^q \\ \Psi_r^d = -X_{sr} I_s^d + X_{rr} I_r^d \\ \Psi_r^q = -X_{sr} I_s^q + X_{rr} I_r^q \end{cases} \quad (59)$$

Ce qui nous permet d'écrire le couple électromagnétique comme :

$$C_{em} = \frac{pX_{sr}}{X_{rr}} (\Psi_r^q \cdot I_s^d - \Psi_r^d \cdot I_s^q) \quad (60)$$

Où p est le nombre de paires pôles de la génératrice.

Les puissances active et réactive quant à elles sont données par les réactions :

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{3}{2} (V_s^d \cdot I_s^d + V_s^q \cdot I_s^q) \\ Q_r &= \frac{3}{2} (V_s^q \cdot I_s^d - V_s^d \cdot I_s^q) \end{aligned} \quad (61)$$

C'est à partir de ces grandeurs que la gestion du flux de puissance sera effectuée dans notre système biénergie.

Chapitre 4 : Modélisation de la partie hydroélectrique

Introduction

L'eau, chargée d'une énergie potentielle traverse la conduite forcée en perdant progressivement cette énergie qui se transforme en énergie cinétique pour faire tourner la turbine qui à son tour fera tourner la génératrice à travers un système d'engrenage mécanique [40]; il s'agit ici de faire ressortir les modèles mathématiques de tous ces sous-systèmes et de procéder à la simulation dans MATLAB/SIMULINK.

4.1. La turbine hydraulique

Elle transforme l'énergie cinétique rectiligne de l'eau en énergie cinétique de rotation afin de faire tourner la génératrice. À partir de la formule 11 on écrit la puissance mécanique produite par la turbine comme suit :

$$P_m = \eta_{hyd} * P_{hyd} \quad (62)$$

Où η_{hyd} est le rendement de la turbine hydraulique;

Afin de pouvoir valider nos résultats par la suite, nous présenterons d'abord le modèle simplifié obtenu à partir des hypothèses simplificatrices suivantes [41]:

- On définit un circuit hydraulique simple et à résistance négligeable;
- On suppose que l'eau est incompressible;
- On admet une conduite forcée rigide;
- La puissance mécanique produite par la turbine est directement proportionnelle à la hauteur de chute;
- Le débit de l'eau est proportionnel à la racine carrée de la hauteur de chute et à l'ouverture de la conduite forcée.

Le couple mécanique C_ω est alors fonction de la hauteur de chute H, de l'ouverture de la conduite forcée G et de la vitesse de rotation Ω_ω de la turbine; il peut alors s'écrire :

$$C_\omega = C_\omega(G, H, \Omega_\omega) \quad (63)$$

À partir des hypothèses simplificatrices on peut écrire la vitesse et la puissance mécanique de l'eau suivant le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} v = K_v \cdot G \cdot \sqrt{H} \\ P_m = K_p \cdot H \cdot v \end{cases} \quad (64)$$

K_v et K_p étant des coefficients de proportionnalité.

Et G caractérisant l'ouverture de la conduite forcée.

Soit un point de fonctionnement défini par les grandeurs de base tel que le système d'équations précédent s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} v_{base} = K_v \cdot G_{base} \cdot \sqrt{H_{base}} \\ P_{mbase} = K_p \cdot H_{base} \cdot v_{base} \end{cases} \quad (65)$$

En effectuant une linéarisation de l'équation 64 autour de ce point de fonctionnement on obtient :

$$\begin{cases} \Delta \bar{v} = \Delta \bar{G} + \frac{\Delta \bar{H}}{2} \\ \Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{v} + \Delta \bar{H} \end{cases} \quad (66)$$

Soit encore :

$$\begin{cases} \Delta \bar{H} = 2(\Delta \bar{v} - \Delta \bar{G}) \\ \Delta \bar{P}_m = 3\Delta \bar{v} - 2\Delta \bar{G} \end{cases} \quad (67)$$

À ce système définissant la variation de vitesse et de puissance on ajoute l'équation de l'accélération de la colonne d'eau, obtenue à partir de la seconde loi de Newton qui s'écrit comme suit :

$$\rho L A \frac{dv}{dt} = -A \rho g \Delta H \quad (68)$$

L est la longueur de la conduite forcée.

Et A l'aire l'une section de conduite forcée.

On introduit les grandeurs de base dans cette équation en divisant les deux membres par l'expression $A\rho.g.H_{base}.v_{base}$, on obtient alors :

$$\frac{L}{gH_{base}v_{base}} \frac{dv}{dt} = -\frac{\Delta H}{H_{base}v_{base}} \quad (69)$$

Soit :

$$\frac{Lv_{base}}{gH_{base}} \frac{d\left(\frac{\Delta v}{v_{base}}\right)}{dt} = -\left(\frac{\Delta H}{H_{base}}\right) \quad (70)$$

On définit la constante de temps T_ω ainsi qu'il suit :

$$T_\omega = \frac{Lv_{base}}{gH_{base}} = \frac{LQ_{base}}{gAH_{base}} \quad (71)$$

On écrit alors :

$$T_\omega \frac{\delta \bar{v}}{\delta t} = -\Delta \bar{H} \quad (72)$$

Le développement du système d'équations 64, associé à l'équation précédente et ramené dans le domaine de Laplace nous donne la fonction de transfert suivante, connue comme modèle simple d'une turbine hydraulique [42].

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_\omega s}{1 + 0.5T_\omega s} \quad (73)$$

$$\frac{\Delta \bar{v}}{\Delta \bar{G}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}T_\omega s} \quad (74)$$

$$\frac{\Delta \bar{H}}{\Delta \bar{G}} = \frac{-1.5T_{\omega}s}{1 + \frac{1}{2}T_{\omega}s} \quad (75)$$

Le schéma bloc SIMULINK correspondant à l'équation 73 est représenté à la figure suivante et la simulation nous donne la courbe de la figure d'après.

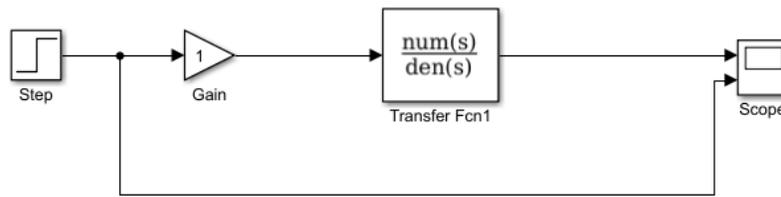


Figure 19: Modèle simple d'une turbine hydraulique

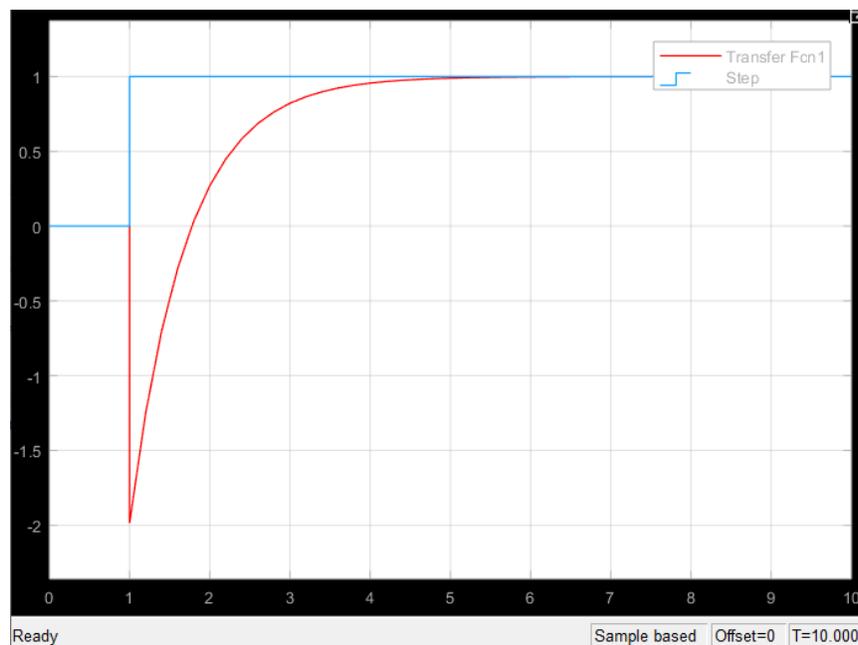


Figure 20: Réponse à un échelon du modèle simple d'une turbine hydraulique.

Dans l'illustration de la courbe précédente, un changement est survenu à t=1s dans les directives (une augmentation du débit de l'eau par ouverture des vannes par exemple), la puissance réagit automatiquement et brusquement dans le sens contraire

à cause de la dépression qui accompagne ce changement [43]; cette puissance croit ensuite de manière exponentielle pour se stabiliser à la nouvelle valeur de référence suivant la constante de temps du système présentée plus haut.

Dans le modèle non simplifié, on suppose que l'eau est un fluide incompressible, que la conduite forcée est rigide et on tient compte des pertes par frottements dans la conduite. La loi de la dynamique du mouvement nous permet alors d'écrire l'équation suivante qui traduit la variation du débit dans la conduite forcée en fonction du temps [44]:

$$\frac{dQ}{dt} = (H_s - H - H_l) \cdot g \cdot \frac{A}{L} \quad (76)$$

Où :

H_s est la hauteur statique de la colonne d'eau

H est la hauteur à l'admission de la turbine

H_l est la perte de charge due au frottement dans le conduit

Il est judicieux de convertir cette équation en pu autour du point de fonctionnement nominal en divisant toutes les grandeurs par leur grandeur de base correspondante, (74) devient;

$$\frac{dQ/dQ_{base}}{dt} = \frac{d\bar{Q}}{dt} = \frac{(H_s - H - H_l)}{H_{base}} \cdot \frac{H_{base} \cdot g \cdot A}{L \cdot Q_{base}} \quad (77)$$

En définissant la constante de temps T_w comme :

$$T_w = \frac{L \cdot Q_{base}}{H_{base} \cdot g \cdot A} \quad (78)$$

On obtient alors l'équation en pu:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = (\bar{H}_s - \bar{H} - \bar{H}_l) \cdot \frac{1}{T_\omega} \quad (79)$$

Par ailleurs le débit Q est fonction de la hauteur de chute H et de l'ouverture de la conduite forcée G il s'écrit :

$$Q = Q(G, H) \quad (80)$$

Soit en pu [44] :

$$\bar{Q} = \bar{G} \cdot \sqrt{\bar{H}} \quad (81)$$

Pour ce qui est de la puissance, elle est obtenue en tenant compte des pertes à vide et des pertes par frottements au niveau de la turbine; on peut alors l'écrire comme suit :

$$P_m = A_t \cdot H \cdot (Q - Q_{AV}) - \beta \cdot G \cdot \Delta\Omega_\omega \quad (82)$$

Avec $\Delta\Omega_\omega$ la déviation de vitesse;

β : la constance de proportionnalité de la déviation de vitesse et il dépend du modèle de la turbine;

Q_{AV} : le débit à vide;

A_t : le gain de la turbine calculé en fonction du modèle de la turbine et défini par :

$$A_t = \frac{1}{\bar{G}_{\max} - \bar{G}_{\min}} \quad (83)$$

Avec \bar{G}_{\max} l'ouverture maximale de la conduite forcée (soit à pleine charge) et \bar{G}_{\min} son ouverture minimale (à vide).

Le modèle non linéaire complet de notre turbine est alors défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{d\bar{Q}}{dt} = (\bar{H}_s - \bar{H} - \bar{H}_l) \cdot \frac{1}{T_\omega} & \text{avec } \bar{Q} = \bar{G} \cdot \sqrt{\bar{H}} \\ P_m = A_t \cdot H \cdot (Q - Q_{AV}) - \beta \cdot G \cdot \Delta\Omega_\omega & \text{en pu} \end{cases} \quad (84)$$

La représentation de ce système d'équations dans MATLAB/SIMULINK est donnée par le schéma bloc suivant :

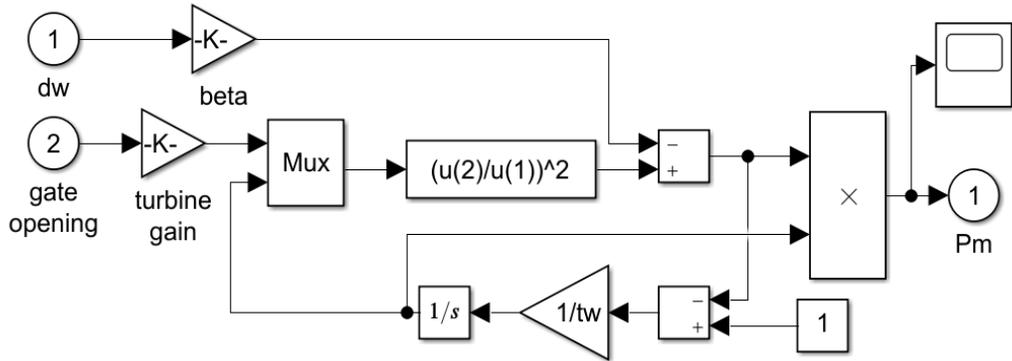


Figure 21: Modèle non linéaire de la turbine hydraulique;

Où dw est la variation de la vitesse de rotation $\Delta\Omega_\omega$.

La régulation de la vitesse de la turbine est assurée par deux systèmes associés en série; il s'agit du contrôle de l'ouverture de la conduite forcée qui est assuré par un système d'équations de second ordre et du contrôle de la vitesse proprement dite, assuré par un contrôleur PID. La fonction de transfert correspondante à cette description est donnée par l'équation suivante [45]:

$$a(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{k_a} s + \frac{t_a}{k_a} s^2} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_e) \quad (85)$$

Avec :

K_p , K_i et K_d les coefficients du contrôleur PID;

Ω_{ref} et Ω_e les vitesses de rotation nominale et réelle de l'axe de la turbine.

k_a et t_a le gain du contrôleur et la constante de temps du cerveau-moteur respectivement ;

Le schéma bloc de simulation dans MATLAB/SIMULINK est le suivant :

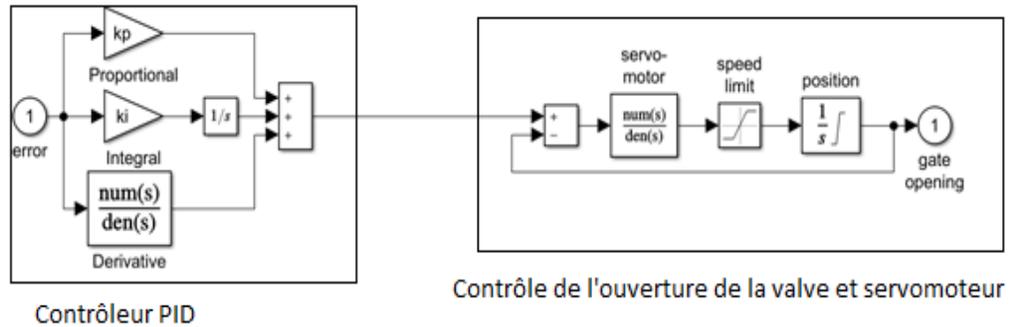


Figure 22: Contrôle de vitesse de la turbine

Le modèle complet de la turbine est alors donné par le schéma suivant :

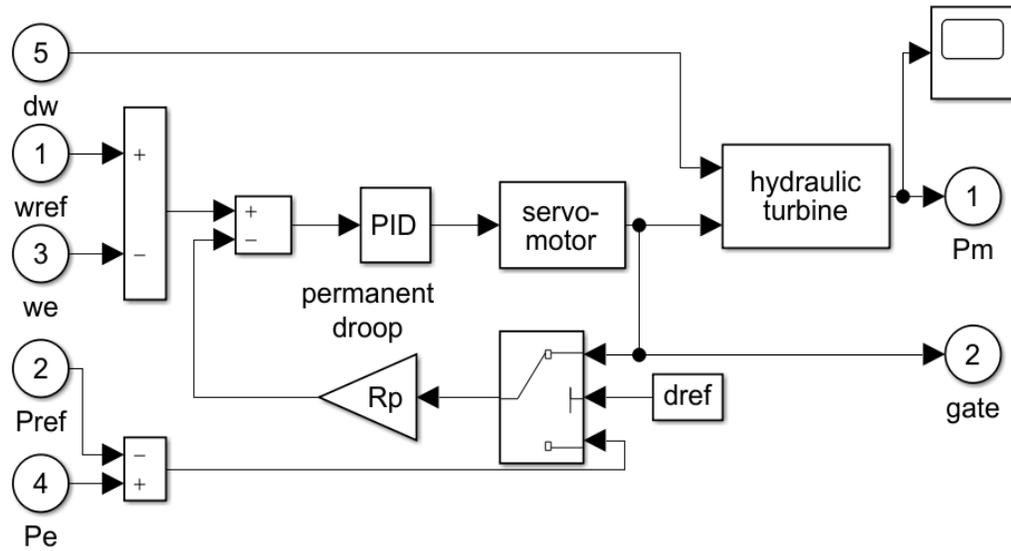


Figure 23: Modèle complet de la turbine hydraulique

Avec :

w_{ref} : la vitesse de référence en pu;

w_e : la vitesse instantanée de la machine;

P_{ref} : la puissance mécanique de référence;

P_e : la puissance électrique de la machine;

P_m : la puissance mécanique à la sortie de la turbine;

Gate : est la variable G qui représente le niveau d'ouverture de la conduite forcée.

À l'aide de l'oscilloscope, on affiche la puissance mécanique à la sortie de la turbine, la simulation du schéma précédent nous donne la courbe de la figure suivante; on remarque que la puissance mécanique se stabilise à 1.01pu après quelques oscillations; ce qui témoigne de l'efficacité du système de régulation utilisé.

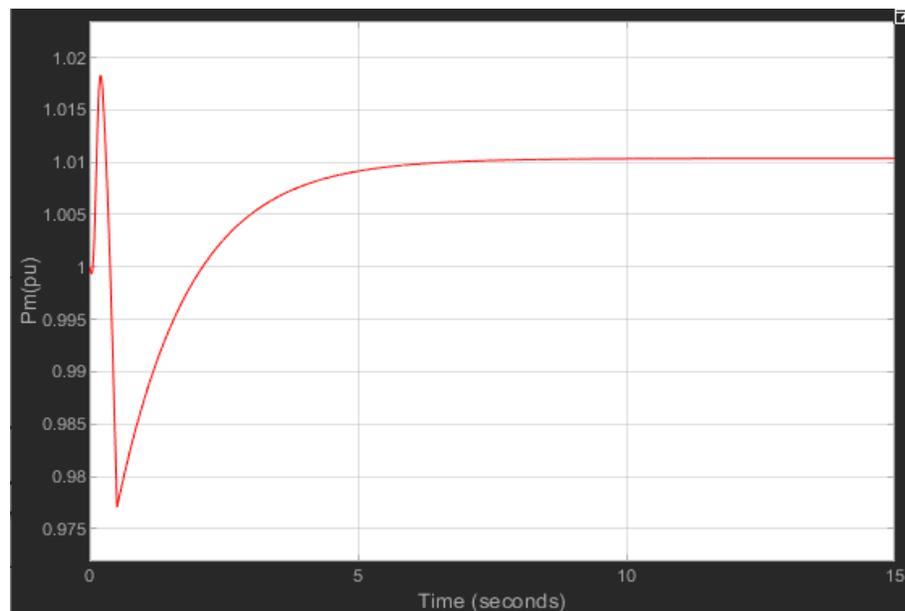


Figure 24: Simulation de la turbine hydraulique

On regroupe alors le schéma précédent dans un modèle compact mettant en évidence uniquement les entrées et les sorties, on obtient le bloc suivant :

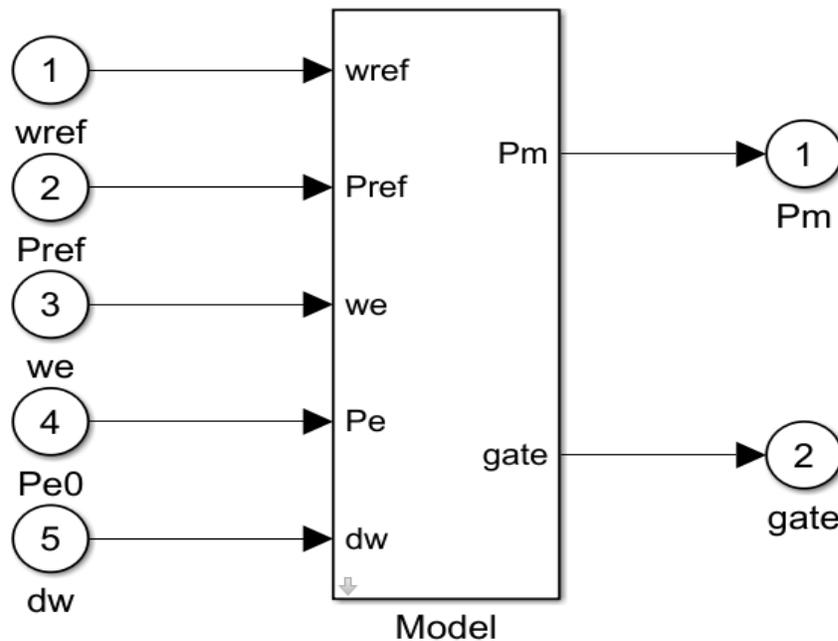


Figure 25: Modèle compact de la turbine hydraulique

4.2. La génératrice synchrone

La génératrice synchrone utilisée dans ce travail sera modélisée suivant deux aspects :

- L'aspect électrique
- L'aspect mécanique

Ceci nous permettra d'avoir un modèle scientifique non seulement pédagogique mais aussi didactique et utile à une éventuelle poursuite de ce travail. Tout de même, afin de simplifier les modèles et réduire la tâche tout en restant fidèle aux modèles disponibles dans la littérature, nous ferons les hypothèses suivantes [46]:

- Les couplages capacitifs entre les enroulements et les courants de foucault sont supposés négligeables; ceci nous permettra plus tard dans la modélisation

d'exprimer tous les flux de la génératrice comme fonction des courants des inductances propres et mutuelles.

- La variation de température n'entraîne pas la modification des grandeurs des résistances de l'induit et de l'inducteur, celles-ci sont donc supposées constantes.
- Les circuits induits, inducteurs et amortisseurs sont les seuls à être parcourus par des courants; pour cela on suppose le circuit magnétique parfaitement feuilleté.
- Pour simplifier les expressions des inductances, on suppose que les forces magnétomotrices des enroulements du stator sont à répartition sinusoïdales parfaites.

Le fonctionnement d'une génératrice synchrone est basé sur sa capacité à transformer l'énergie mécanique $(C_\omega, \Omega_\omega)$ en énergie électrique (I, V, f) . Celle utilisée dans ce travail est à aimant permanent tournant à la vitesse N dans un flux variable $\psi(t)$ créant ainsi une f.é.m induite (équation 25 de la section précédente) au stator encore appelé induit [46].

Le rotor ou l'inducteur est un aimant avec un nombre de pôles paires dont les enroulements sont alimentés par un courant continu constant pour créer le synchronisme (courant d'excitation). Un schéma simplifié de la génératrice synchrone est donné à la figure suivante, il nous permettra d'écrire les équations des courants tensions et flux.

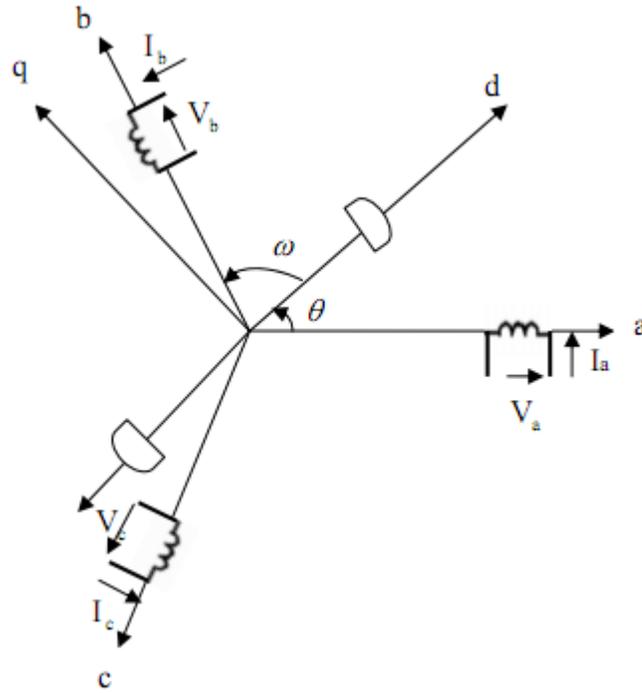


Figure 26: schéma simplifié de la génératrice synchrone [46]

4.2.1. Modèle électrique de la génératrice synchrone

La mise en équation de la génératrice synchrone en utilisant le schéma et les hypothèses simplificatrices précédentes, nous donne le système d'équations de tension au stator, donné par l'équation 86. Cette mise en équation ainsi que les développements mathématiques qui vont suivre sont disponibles dans les références suivantes [28, 47, 48]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (86)$$

V_{abc} : les tensions des phases statoriques.

R : la résistance d'un enroulement statorique.

I_{abc} : les courants des phases statoriques.

ψ_{abc} : les flux induits dans les phases statoriques.

Par ailleurs, les expressions de flux dans les phases a, b et c sont données par le système suivant [47], cette expression simplifiée est obtenue grâce à l'hypothèse selon laquelle les forces magnétomotrices des enroulements du stator sont à répartition sinusoïdales parfaites.

$$\begin{cases} \psi_a = L_{sc} \cdot I_a + \psi_{fa} \\ \psi_b = L_{sc} \cdot I_b + \psi_{fb} \\ \psi_c = L_{sc} \cdot I_c + \psi_{fc} \end{cases} \quad (87)$$

Avec $L_{sc} = (L_s - M_s)$: l'inductance cyclique d'un enroulement statorique.

L_s : l'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : l'inductance mutuelle entre phases du stator.

$\psi_{fa,b,c}$: le flux mutuel de l'aimant sur chaque phase

On en déduit alors les expressions des tensions en fonction des flux :

$$\begin{cases} V_a = R \cdot I_a + L_{sc} \cdot \frac{dI_a}{dt} + \frac{d\psi_{fa}}{dt} \\ V_b = R \cdot I_b + L_{sc} \cdot \frac{dI_b}{dt} + \frac{d\psi_{fb}}{dt} \\ V_c = R \cdot I_c + L_{sc} \cdot \frac{dI_c}{dt} + \frac{d\psi_{fc}}{dt} \end{cases} \quad (88)$$

Les équations électriques rotoriques quant à elles sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} \quad (89)$$

Avec :

V_f : la tension perçue par le circuit d'excitation.

$V_{D,Q}$: les tensions perçues par les axes D et Q au stator de la génératrice.

$R_{f,D,Q}$: les résistances rotoriques, et des amortisseurs des axes polaire et interpolaire.

I_f : le courant perçue par le circuit d'excitation (rotor).

$I_{D,Q}$: les courants perçus par les barres d'amortisseurs dans les axes D et Q.

ψ_f : le flux induit dans le rotor.

$\psi_{D,Q}$: les flux induits dans les amortisseurs des axes polaire et interpolaire

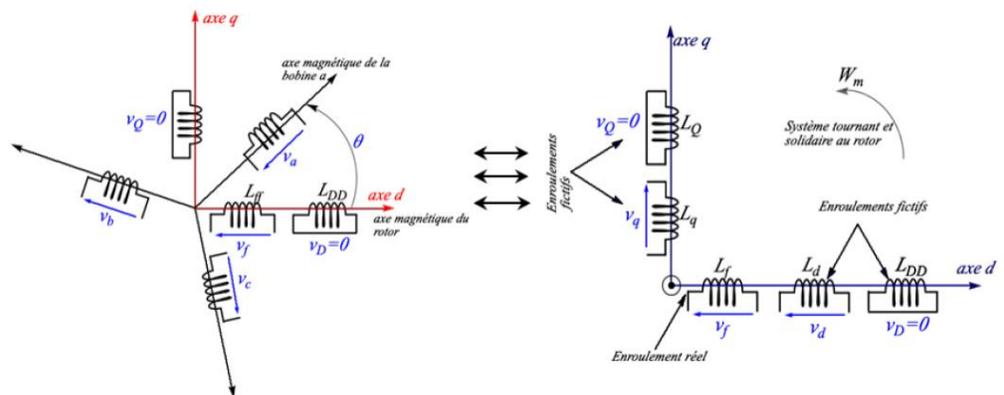


Figure 27: illustration des tensions perçues par les enroulements de la génératrice synchrone, dans le repère abc (à gauche) et dq0 (à droite) [49].

Or tel qu'illustrées à la figure ci-dessus, les tensions perçues par les axes des amortisseurs D et Q au stator de la génératrice sont nulles car ces amortisseurs sont des conducteurs en cuivre maintenus en court-circuit, le système précédent s'écrit alors comme suit :

$$\begin{cases} V_f = R_f \cdot I_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ 0 = R_D \cdot I_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ 0 = R_Q \cdot I_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \end{cases} \quad (90)$$

a) Modèle mécanique de la génératrice synchrone

Dans certaines situations, génératrice synchrone peut être modélisée par une représentation simplifiée en limitant la dynamique du groupe turbo-alternateur à celle de son moment d'inertie, ceci nous permet d'avoir les équations mécaniques simplifiées suivantes :

$$C_\omega - C_r = J \frac{d\Omega_\omega}{dt} + f\Omega_\omega \quad (91)$$

Avec :

C_r : le couple résistant de la charge.

J : le moment d'inertie du rotor.

Et f : le coefficient de frottement visqueux.

4.2.1. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park.

La transformée de Park nous permet ici de passer d'un repère triphasé fixe lié au stator, à un repère biphasé mobile lié au rotor; en dehors de l'aspect pédagogique et didactique, l'utilisation de la transformée de Park nous facilitera l'implémentation des modèles obtenus dans MATLAB/SIMULINK® et sera très utile pour une éventuelle continuation de ce travail. On écrit alors :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (92)$$

Avec $P^{-1}(\theta)$ la matrice inverse de Park donnée par l'expression :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (93)$$

Et $P(\theta)$ étant donné par :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (94)$$

Par ailleurs, la loi d'ohm généralisée s'écrit :

$$V_{abc} = R.I_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \quad (95)$$

On pose alors :

$$V_{dqo} = P.V_{abc}, \quad I_{dqo} = P.I_{abc}, \quad \psi_{dqo} = P.\psi_{abc} \quad (96)$$

En insérant les expressions 96 dans l'expression 95, on obtient la loi d'ohm généralisée dans le repère dq :

$$V_{dqo} = P.R.P^{-1}.I_{dqo} + P.\frac{d(P^{-1}.\psi_{dqo})}{dt} \quad (97)$$

$$V_{dqo} = R.I_{dqo} + \frac{d\psi_{dqo}}{dt} + \omega_m.\psi_{dqo}.P\frac{d(P^{-1})}{dt}$$

$$\frac{dP^{-1}}{d\theta} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix}, \quad P \cdot \frac{dP^{-1}}{d\theta} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (98)$$

On obtient alors :

$$V_{dqo} = R \cdot I_{dqo} + \frac{d\psi_{dqo}}{dt} + \omega_m \cdot \psi_{dqo} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (99)$$

La conversion de cette équation en pu nous permet d'écrire l'équation de la loi d'ohm généralisée au stator comme :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_m} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix} \quad (100)$$

ω_n : pulsation naturelle du réseau en pu.

ω_m : vitesse de rotation du rotor en pu.

L'axe homopolaire étant nul, on considère uniquement les deux premières équations du système précédent, et on obtient alors :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_0 & 0 \\ 0 & -R_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} + \omega_m \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} \quad (101)$$

Les équations électriques rotorique et statorique de la génératrice synchrone dans le repère de Park sont donc données par le système suivant qui combine les équation (35) et (46).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_d = -r_a \cdot i_d + \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_m \psi_q \\ v_q = -r_a \cdot i_q + \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_m \psi_d \\ v_f = r_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \psi_f \\ 0 = r_D \cdot i_D + \frac{d}{dt} \psi_D \\ 0 = r_Q \cdot i_Q + \frac{d}{dt} \psi_Q \end{array} \right. \quad (102)$$

4.3. Le système d'excitation de la génératrice synchrone

Comme mentionné au chapitre précédent, le but de l'excitatrice est de fournir le courant continu nécessaire pour créer un champ magnétique au rotor de la génératrice. À cet effet, le système d'excitation doit correspondre avec le modèle de la machine synchrone car les signaux de commande d'entrée du système d'excitation sont les quantités désirées des grandeurs au stator de la machine synchrone et la vitesse du rotor. Dans ce travail nous avons utilisé le bloc d'excitation AC1A de MATLAB/SIMULINK®. Il s'agit d'un système d'excitation de type AC sans bague collecteur ou brushless, on parle aussi de système auto-excité. Son schéma bloc se présente comme suit :

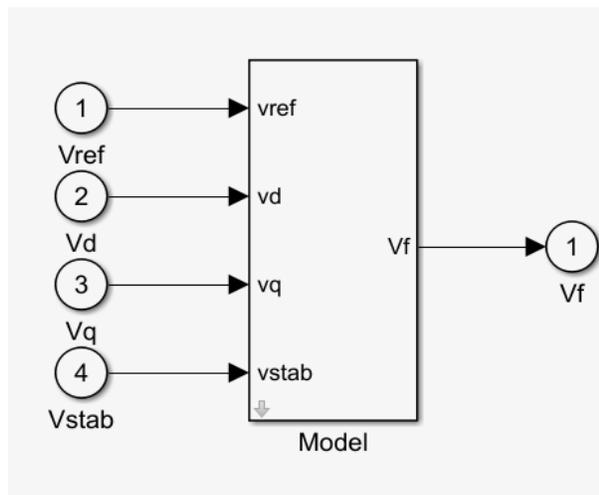


Figure 28: schéma bloc du système d'excitation

Avec :

V_{ref} : La valeur de référence de la tension aux bornes du stator (il s'agit de la valeur désirée de la tension aux bornes du stator de la génératrice).

V_d : la tension statorique suivant l'axe d (il s'agit de la valeur actuelle calculée de la tension sur l'axe d de la génératrice).

V_q : la tension statorique suivant l'axe q (il s'agit de la valeur actuelle calculée de la tension sur l'axe d de la génératrice).

V_{stab} : la tension de stabilisation (cette entrée peut être connectée à un stabilisateur de système d'alimentation pour fournir une stabilisation supplémentaire des oscillations du système d'alimentation ou tout simplement à la masse comme c'est le cas dans ce travail)

Ce bloc modélise un alternateur AC entraînant un redresseur à diode pour produire la tension de champ V_f requise par le bloc de machine synchrone. Un régulateur de tension non contrôlé fournit une tension en p.u avec une limite inférieure à zéro imposée par le redresseur à diodes [50]. Il est constitué de plusieurs sous-systèmes qui seront développés dans la suite de cette partie.

Dans l'onglet contrôleur, on a :

- Un filtre passe bas dont la constante de temps est une valeur par défaut du modèle (0.02).
- Un régulateur de tension avec des limites internes de tension V_{Amin} , V_{Amax} et des limites de tension de sortie V_{Rmin} , V_{Rmax} le tout en p.u.
- Un filtre d'amortissement représentant la boucle de retour.

- Un compensateur des avances et retard transitoire qui ne sera pas pris en compte dans ce travail (gain à zéro) pour des mesures de simplification.

Dans l'onglet de l'excitateur et redresseur, on a :

- L'excitateur proprement dit.
- Un bloc complet gérant la saturation à l'intérieur de l'excitateur largement développé dans la référence [51].

4.3.1. Le filtre passe bas

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + t_r \cdot s} \quad (103)$$

Où t_r est la constante de temps du filtre passe bas

4.3.2. Le régulateur de tension.

Le régulateur contenu dans le système d'excitation fournit une tension dont l'expression peut être écrite comme suit [52]:

$$E_f = x_{md} \cdot i_f \quad (104)$$

Qui peut encore s'écrire dans le domaine de Laplace comme :

$$E_f(s) = x_{md} \cdot I_f(s) \quad (105)$$

Par ailleurs, l'expression de la tension de champ dans le domaine de Laplace en réduisant le flux à $\psi_f = x_{ff} \cdot i_f$ est donnée par :

$$V_f(s) = r_f \cdot I_f(s) + \frac{x_{ff}}{\omega_n} I_f(s) \quad (106)$$

Le rapport entre (104) et (105) nous donne alors la fonction de transfert qui définit l'excitatrice de notre génératrice synchrone.

$$E_f(s) = \frac{k_a}{t_a \cdot s + 1} V_f(s), \quad \text{avec} \quad k_a = \frac{x_{md}}{r_f} \quad \text{et} \quad t_a = \frac{x_{ff}}{\omega_n \cdot r_f} \quad (107)$$

4.3.3. Le filtre d'amortissement

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$G_{fd}(s) = \frac{k_{fd} \cdot s}{1 + t_{fd} \cdot s} \quad (108)$$

4.3.4. Le compensateur

Il est représenté par une fonction de transfert dont l'expression est donnée par :

$$G_c(s) = \frac{1 + t_c \cdot s}{1 + t_b \cdot s} \quad (109)$$

4.3.5. L'excitatrice proprement dite

Son stator est alimenté par la tension E_f fournie par le régulateur de tension après la gestion de la saturation magnétique et sa sortie est la tension qui alimente le rotor de la génératrice synchrone, elle dépend de la structure même de l'excitatrice c'est-à-dire de sa courbe de saturation et de ses redresseurs; on écrit alors l'équation de tension aux bornes de celui-ci:

$$E_f - R_e \cdot i_e - N_e \frac{d\varphi_e}{dt} = 0 \quad (110)$$

Avec R_e la résistance des enroulements de l'excitatrice

N_e son nombre de spire;

Et φ_e le flux total résultant de la somme du flux d'entrefer φ_a et du flux de fuite φ_f qui est à son tour proportionnel au flux d'entrefer [36]; on écrit alors :

$$\varphi_e = \varphi_a + \varphi_f = \varphi_a + c \cdot \varphi_a = (1 + c) \varphi_a = \sigma \varphi_a \quad (111)$$

σ étant le coefficient de dispersion qui dépend de l'excitatrice elle-même.

En réduisant le redresseur interne de l'excitatrice à un gain et en admettant que la tension induite par les enroulements du rotor est proportionnelle au flux d'entrefer on écrit la relation suivante :

$$v_f = k' \varphi_a \Rightarrow \varphi_a = \frac{1}{k'} v_f \quad (112)$$

Soit alors :

$$\varphi_e = \sigma \varphi_a = \frac{\sigma}{k'} v_f \quad (113)$$

On remplace alors le flux par son expression dans l'équation de maille et on obtient :

$$E_f - R_e \cdot i_e - \frac{N_e \sigma}{k'} \frac{dv_f}{dt} = 0 \quad (114)$$

On pose :

$$T_e = \frac{N_e \sigma}{k'} \quad (115)$$

En négligeant la non-linéarité de la fonction de saturation on écrit :

$$i_e = \frac{v_f}{x_{em0}} \quad (116)$$

Avec x_{em0} la réactance de magnétisation non saturée de l'excitatrice.

On obtient alors l'équation différentielle de l'excitatrice dans le domaine temporel :

$$T_e \frac{dv_f}{dt} + K_e \cdot v_f = E_f \quad (117)$$

$$\text{Avec } K_e = \frac{R_e}{x_{em0}}.$$

On ramène alors cette équation dans le domaine de Laplace afin d'obtenir la fonction de transfert de premier ordre qui sera implémentée dans MATLAB/SIMULINK®. On a alors :

$$G_e(s) = \frac{V_f}{E_f} = \frac{1}{K_e + T_e \cdot s} \quad (118)$$

En associant tous les blocs ensemble, on obtient le schéma blocs suivant, qui est la représentation de l'excitatrice de la génératrice synchrone :

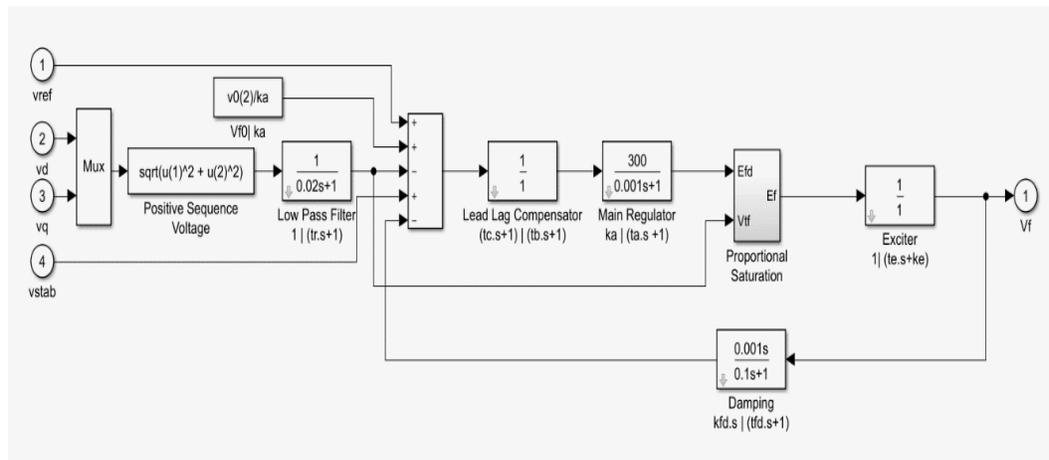


Figure 29 : schéma bloc du système d'excitation

Conclusion

Ici nous avons présenté la modélisation d'une centrale hydroélectrique en écrivant les équations mathématiques du fonctionnement des différents blocs qui la constituent, c'est-à-dire les équations de la turbine hydraulique et de son système de régulation, ainsi que les équations de la génératrice synchrone et son système d'excitation

Chapitre 5 : Simulation, présentation et discussion des résultats

Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons le système complet en mettant ensemble les deux blocs modélisés précédemment, nous effectuerons ensuite des simulations afin d'observer le comportement du système en fonctionnement normal et en fonctionnement en présence de contingence. On pourra ainsi observer le basculement d'une source à une autre en fonction de la disponibilité de la ressource primaire et même mesurer la contribution de chaque source lorsque ces deux opèrent ensemble.

5.1. Modèle complet du système

Après la modélisation mathématique, le modèle de notre système est obtenu dans MATLAB/SIMULINK® en utilisant des blocs fonctionnels prédéfinis dans le dit logiciel; des modifications des données et la mise en commun correct de ces blocs ont ensuite été réalisées afin d'atteindre nos objectifs.

5.2.1. Hypothèse de conception

Les hypothèses de conception nous permettent d'initialiser le système et de clarifier les différents blocs afin de faciliter la compréhension de notre système.

Cela étant, la turbine éolienne qui entraîne la génératrice asynchrone et qui constitue la source d'énergie primaire pour la partie éolienne est alimentée par un bloc de simulation de vitesse du vent et ce dernier peut être modifié en fonction des conditions de vent désirées. Le bloc suivant décrit le modèle en question.

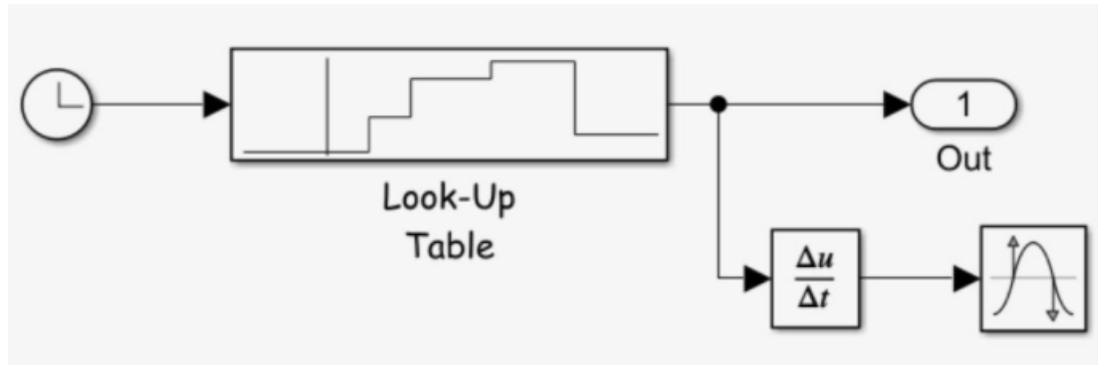


Figure 30: Vitesse du vent

Une série de valeurs aléatoires est attribuée au profil du vent, ces valeurs sont choisies dans une plage acceptable de vitesse du vent et change toutes les secondes pendant les 5 secondes que durent la simulation. On présentera les résultats pour des plages de vitesses de vent faible, moyen, fort et même constant.

La turbine hydraulique quant à elle est alimentée directement par un bloc de vitesse et puissance de référence fixées respectivement à 1 et 0.7516 pu; elle fournit alors la puissance mécanique nécessaire pour l'entraînement de la génératrice synchrone. Cette dernière est également alimentée par une excitatrice dont la tension de référence est fixée à 1 pu. Des rétroactions sont utilisées par la turbine et l'excitatrice pour réguler en tout temps la puissance mécanique produite par la turbine et la tension d'excitation nécessaire pour générer le champ tournant au stator de la génératrice synchrone.

5.2.2. Présentation du modèle

Le modèle complet de notre microcentrale hybride hydro-éolienne isolée sans système de stockage est présenté à la figure 31. Ce modèle a été développé pour alimenter en énergie électrique, les collectivités éloignées du réseau national de distribution de l'énergie. Conçue sous l'environnement MATLAB/SIMULINK®, la microcentrale présentée dans ce travail utilise :

- Une turbine éolienne alimentant une génératrice asynchrone de puissance fixe 275kVA (cette puissance peut être modifiée directement dans les paramètres du bloc turbine de Matlab) et une tension de 480V;
- Une turbine hydraulique alimentant une génératrice synchrone de puissance 300kVA et de tension 480V (Les tensions sont choisies identiques afin d'éliminer les problèmes d'interconnexion aux jeux de barre de connexion des deux sources de production);
- Une charge principale de 250 kW et une charge secondaire variable, programmée pour s'ajouter à la charge principale 2.5 minutes après le début de la simulation
- Un correcteur de facteur de puissance côté éolien, car cette dernière pour son fonctionnement consomme de la puissance réactive.

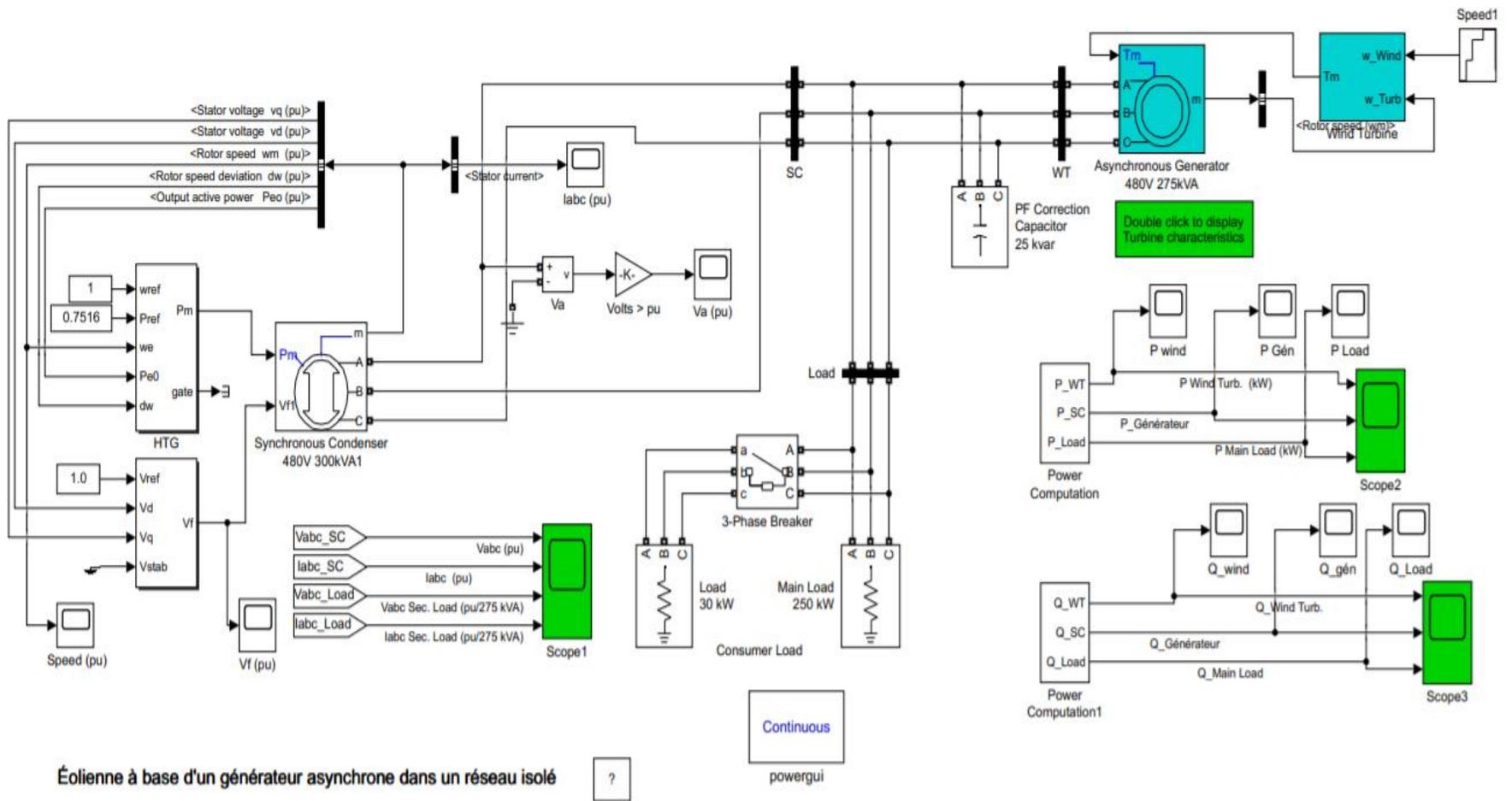


Figure 31: Modèle complet du système hybride hydro-éolienne

Plusieurs blocs de visualisation (oscilloscopes) sont intégrés à notre schéma afin de relever les informations dont nous avons besoin pour expliquer le fonctionnement de notre système.

5.2. Simulation et présentation des résultats

Dans cette partie nous présenterons le comportement des grandeurs caractéristiques (courant, tension, puissance) de notre système dans plusieurs scénarios de fonctionnement possible de notre microcentrale.

5.2.1. Simulation avec une plage de vitesse de vent faible variant de manière aléatoire de 5 à 10 m/s.

La simulation a été effectuée sur une durée de 5 secondes avec une charge initiale de 250kw à laquelle on a ajouté 30kw à partir de 2.5 secondes. Le profil du vent utilisé ici est faible avec des valeurs allant de 5 à 10m/s et changeant de manière aléatoire à partir de 0.5s. profil du vent [5 7 9 10 6], temps de changement de vitesse [0 0.5 1 2 3].

- Comportement courant tension;

L'oscilloscope 1 nous permet de relever la tension V_{abc}^s produite par la génératrice synchrone, le courant I_{abc}^s qu'elle débite; ainsi que la tension V_{abc} aux bornes de la charge et le courant I_{abc} que celle-ci consomme.

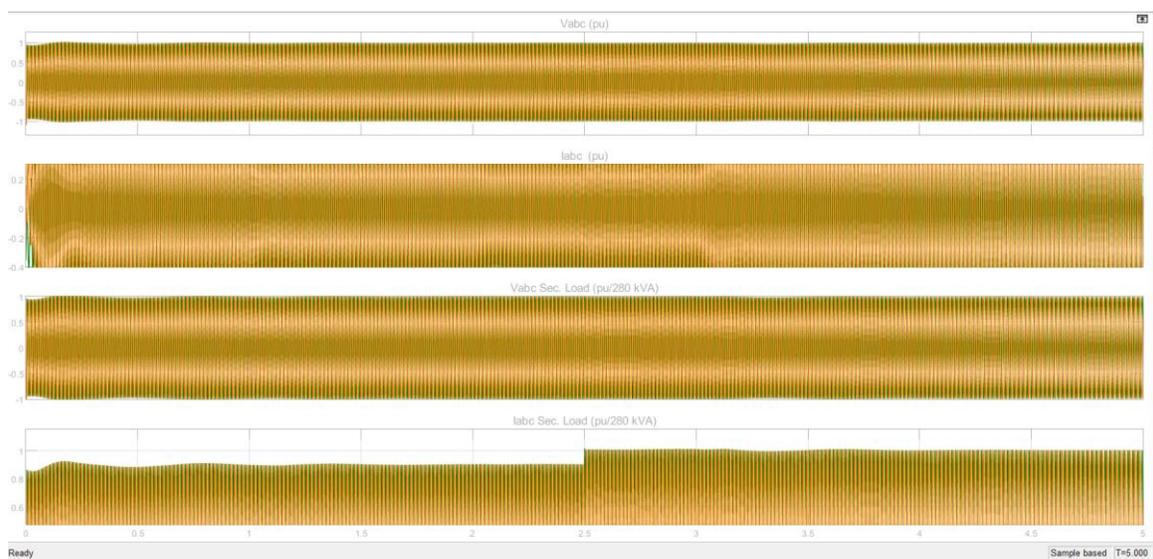


Figure 32: Comportement courant tension pour des vents faibles

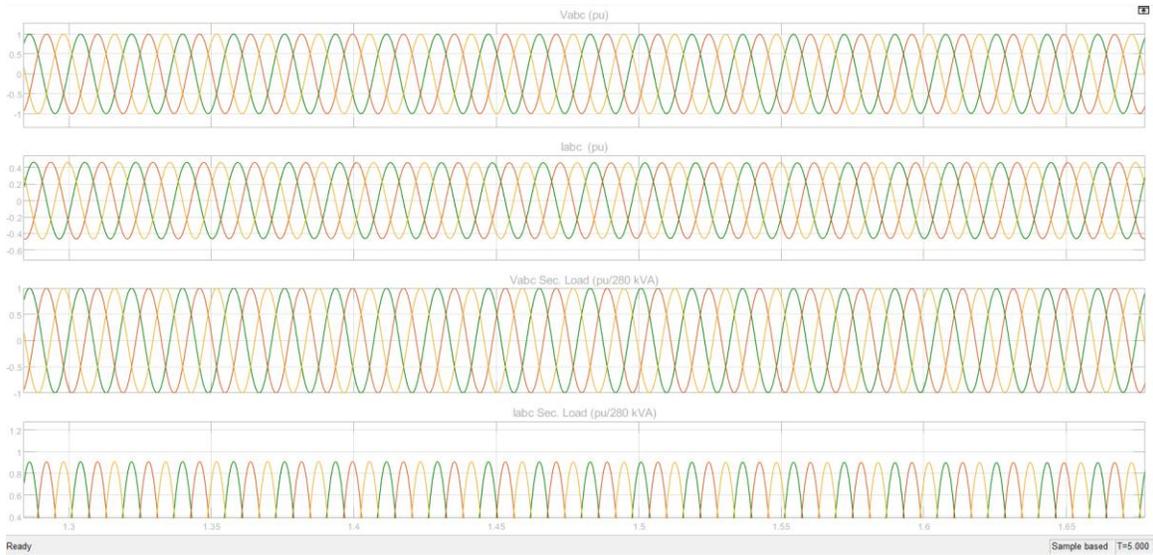


Figure 33: zoom sur la caractéristique courants et tensions

Un zoom sur la courbe présentée à la figure 32 nous permet d’avoir la figure 33 où on peut voir clairement l’amplitude (environ 1pu pour les tensions) la fréquence (60hz) et le plus important la forme sinusoïdale des grandeurs représentées.

Un autre zoom est effectué sur le même graphique mais cette fois vers la valeur $t=2.5s$, temps à partir duquel la charge passe de 250kw à 270kw grâce à la fermeture de l’interrupteur temporisé utilisé dans la simulation pour ajouter la charge de 30kw.

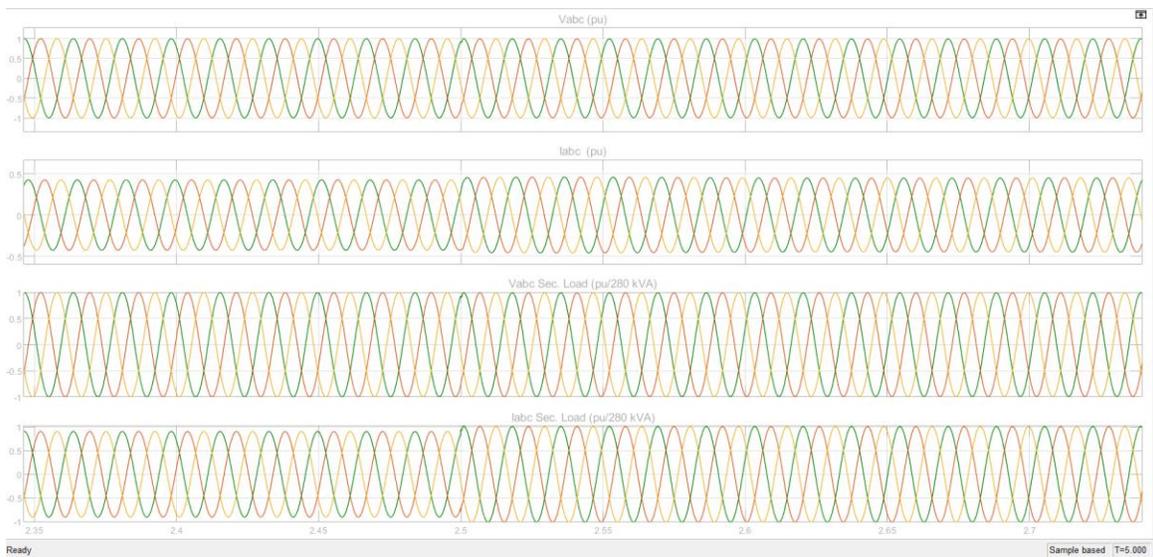


Figure 34: zoom illustratif de l'effet de la variation de charge

On remarque alors une légère augmentation du courant consommé par la charge à partir de 2.5s, cette augmentation est bien due à l'augmentation de la puissance de la charge. Elle se répercute aussitôt sur le courant que débite la génératrice synchrone par un augmentation de celui-ci. Bien sûr la tension reste inchangée et sans aucune oscillation étant donné que la variation de la charge est très faible.

- Comportement de la puissance active ;

On remarque que la charge est alimentée simultanément par les deux sources de production éolienne et hydraulique, avec la puissance produite par la source éolienne qui varie bien en fonction des variations de la vitesse du vent. Ceci s'explique par le fait que notre charge est prioritairement alimentée par la source éolienne à la limite de sa capacité de production. La source hydraulique joue donc le rôle d'appoint en ajustant sa production en fonction de celle de la source éolienne. On peut lire cela sur le graphe de la figure 35 avec des variations de la puissance éolienne à 0.5s, 1s, 2s, 2.5s,3s; la variation peut être une augmentation ou une diminution en fonction que la vitesse du vent passe d'une valeur petite une valeur plus grande ou d'une grande valeur à une valeur plus petite.

Exemple : à $t=2s$, la vitesse du vent passe de 9m/s à 10m/s, ce qui se traduit par une augmentation de la puissance produite par l'éolienne qui passe d'une valeur presque nulle à la valeur d'environ 30kw.

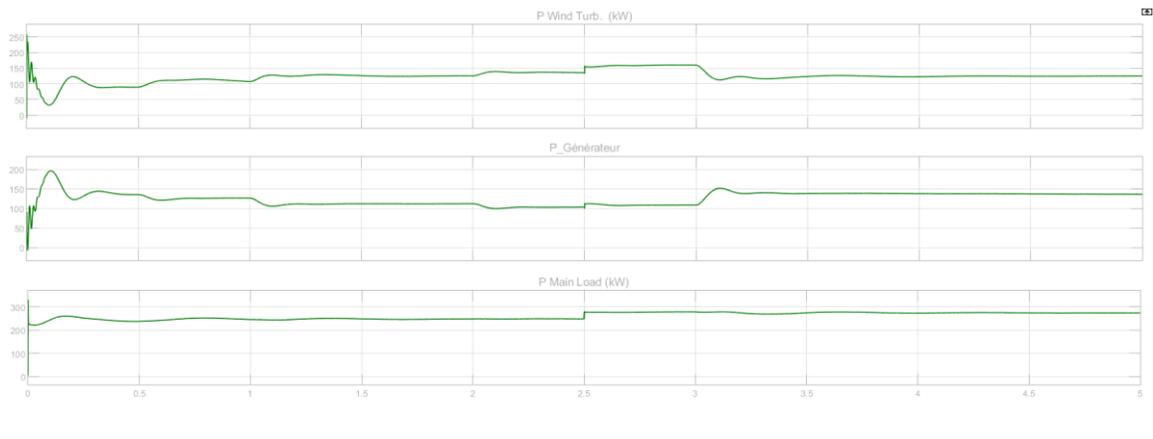


Figure 35: comportement de la puissance active pour des vents faibles

Par contre l'augmentation de la production éolienne observée à $t=2.5s$ est bien dû à l'augmentation de la charge et non à la variation de la vitesse du vent; on peut remarquer que à cet instant précis les deux sources éolienne et hydraulique augmentent leur production pour prendre en charge la puissance supplémentaire de la charge, c'est d'ailleurs le seul moment où les deux sources évoluent dans le même sens, parce que pour les autres tronçons de courbe, on observe toujours une augmentation de puissance hydraulique pour une diminution de puissance éolienne ou inversement.

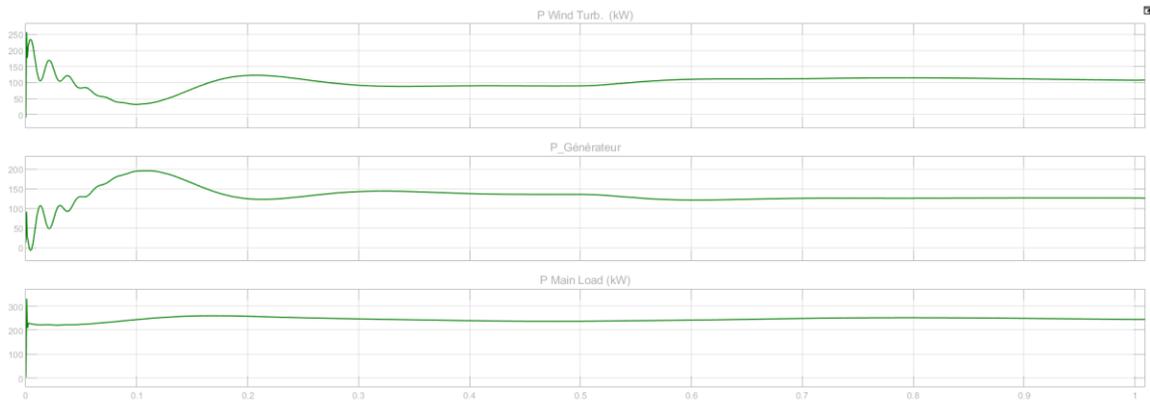


Figure 36: oscillations en début de simulation

Un zoom sur le début de la simulation nous permet de mettre en évidence de petites oscillations en début des courbes de puissance, il s'agit des oscillations transitoires au démarrage des machines. On remarque également que la source éolienne ne commence réellement sa production qu'à partir de $t=1s$, temps auquel la vitesse du vent passe de 7 à 9m/s; en effet dans la pratique, la vitesse de démarrage de la plupart des éoliennes se situe autour de 8m/s; ceci signifie qu'avant cet instant la charge est alimentée uniquement par la source hydraulique.

Un autre zoom à $t=2.5s$ nous permet de bien observer les différentes déviations au niveau de la charge de la génératrice synchrone (source hydraulique) et de la génératrice asynchrone (source éolienne) : on peut alors voir la charge qui passe de 250 à 270kw, la production éolienne qui augmente en conséquence tout en étant limitée par le maximum de puissance qu'elle peut produire (celle-ci est imposée par la vitesse du vent) et la production hydraulique qui augmente également pour compléter efficacement la puissance éolienne produite afin d'alimenter la nouvelle charge.

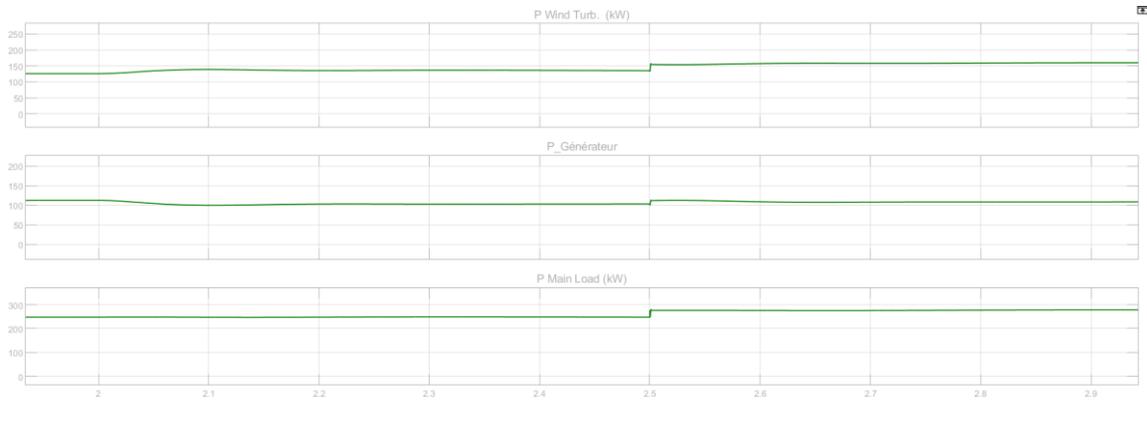


Figure 37: zoom sur la variation des puissances à 2.5s

- Comportement de la puissance réactive;

Les oscillations observées au démarrage sont également présentes pour la puissance réactive; une fois passée la phase transitoire des génératrices on remarque que la puissance réactive de l'éolienne est négative, ceci est dû au fait que l'éolienne dans son fonctionnement consomme de la puissance réactive, cette dernière va lui être fournie par la partie hydraulique qui, comme on peut le remarquer en produit (puissance réactive positive). La puissance réactive pour la charge est nulle (de l'ordre de 10^{-9}) car la charge utilisée dans la simulation est une charge active et donc ne consomme pas de puissance réactive pour son fonctionnement.

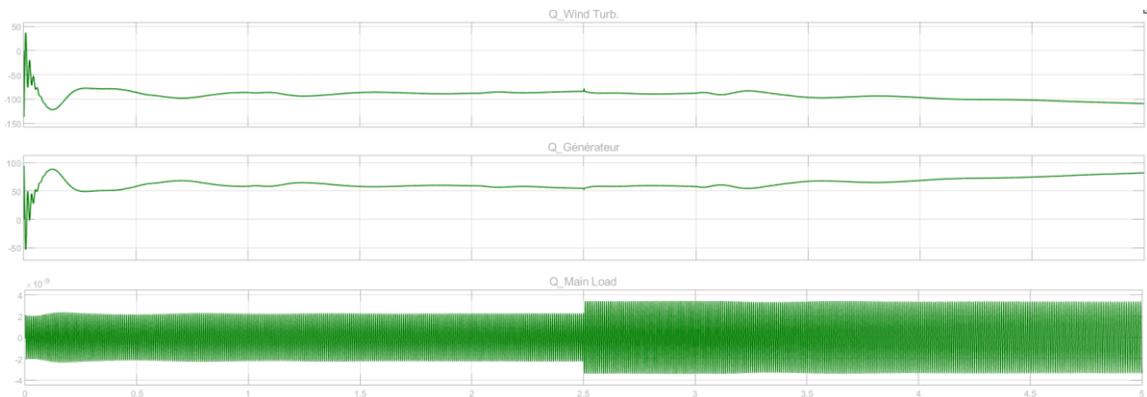


Figure 38: courbe des puissances réactives pour des vents faibles

5.2.2. Simulation pour des vents allant de 8 à 15 m/s

On admet le profil suivant du vent : [8 12 10 15 9], la charge reste inchangée c'est-à-dire 250kw + 30kw à 2.5s

- Comportement courant tension

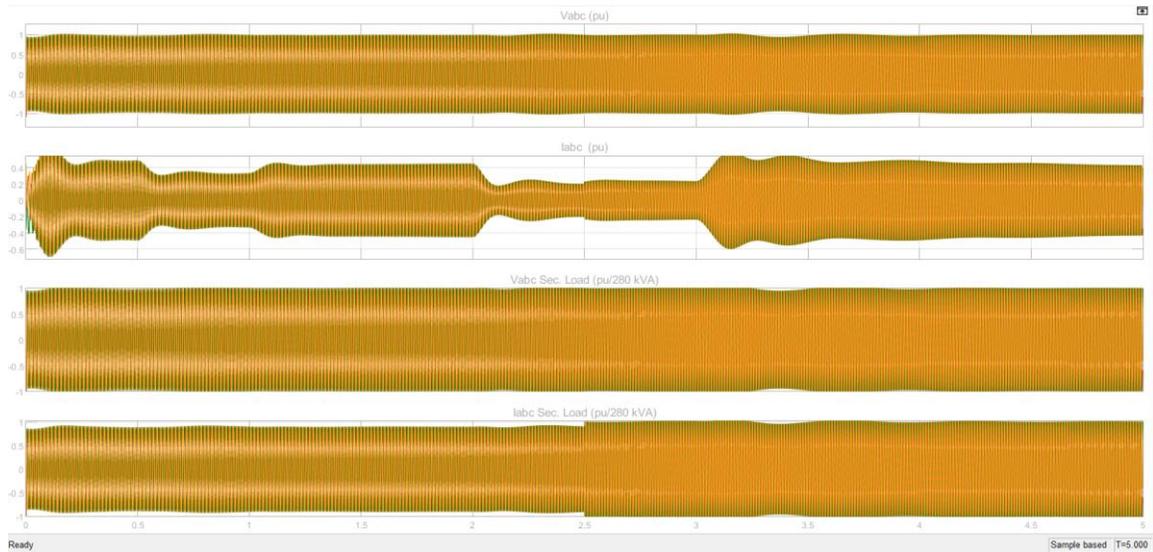


Figure 39:comportement courant et tension avec le vent allant de 8 à 15m/s

La tension délivrée par la génératrice synchrone reste sinusoïdale et constante en amplitude, il en est de même pour la tension aux bornes de la charge. Pour ce qui est du courant, on observe comme précédemment une augmentation de celui-ci dans la charge à 2.5s traduisant bien sur l'augmentation de la puissance de la charge. Ce qui est nouveau ici c'est la grande diminution du courant débité par la génératrice synchrone après $t=2s$; cela s'explique par le fait que à $t=2s$ la vitesse du vent passe de 10 à 15m/s ce qui augmente considérablement la production de l'éolienne et donc diminue celle de la partie hydraulique car la somme des puissances produites doit être à tout instant égale à la puissance consommée par la charge.

- Comportement de la puissance active

On remarque que le comportement de la puissance active pour les deux sources reste similaire au comportement de la section précédente avec les vents faibles à la différence qu'on observe mieux les variations et la production éolienne est beaucoup plus importante avec ces vitesses de vents forts.

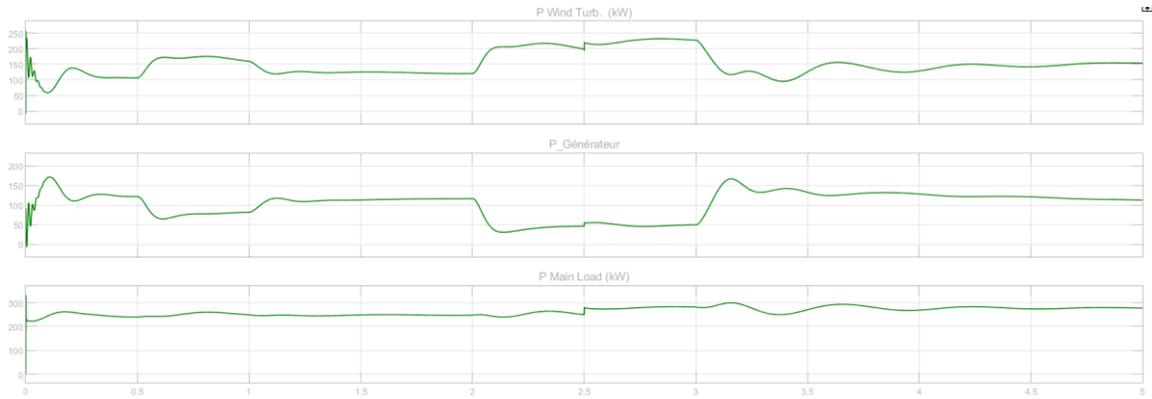


Figure 40: évolution de la puissance active pour des vents de 8 à 15m/s

- Comportement de la puissance réactive

L'évolution de la puissance réactive quant à elle est bien plus perceptible et plus représentative d'un système avec une vitesse de vent variable; elle reste tout de même similaire à la section précédente avec l'éolienne qui consomme de la puissance réactive et l'hydraulique qui en produit. On observe quelques pics de consommation éolienne (et donc de production hydraulique) parmi lesquels un après 2s lorsque la vitesse du vent passe de 9 à 15m/s

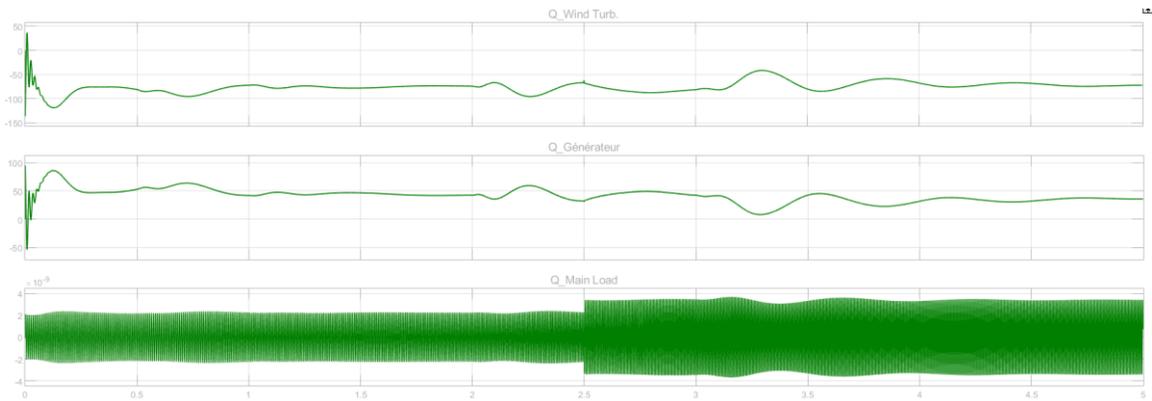


Figure 41: évolution de la puissance réactive pour des vents de 8 à 15m/s

La consommation en puissance réactive de la charge reste nulle, celle-ci étant active, le changement de vitesse du vent n'y à aucun effet.

5.2.3. Simulation avec une vitesse de vent constante égale à 12 m/s

On fixe à présent la vitesse du vent constante et égale à 12m/s, et on présente dans cette section les résultats de simulation obtenus. Ceci est purement expérimentale car dans la pratique on a rarement à faire à des vitesses de vent constants.

- Tension et courant

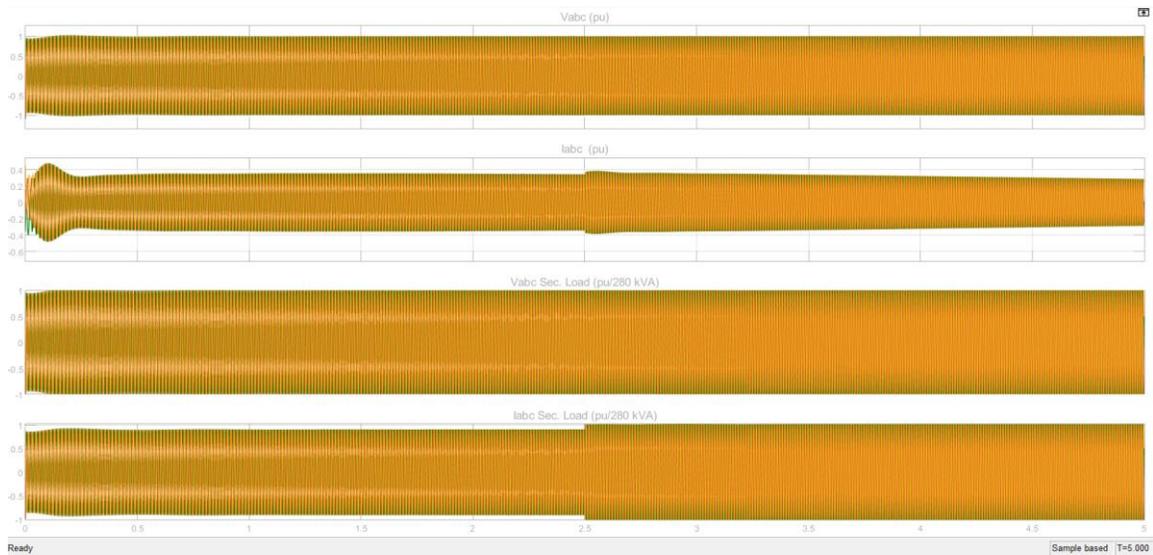


Figure 42: caractéristique courant et tension kVA pour une vitesse de vent fixe

Pour une vitesse de vent fixe le seul changement au niveau des courant est observé à 2.5s lorsqu'on ajoute 30kw à la charge initiale.

- Puissance active

L'éolienne produit alors une puissance relativement constante et à la limite de ce qu'un vent de 12 m/s peut lui permettre de produire. La puissance de l'hydraulique reste également constante et suit fidèlement la courbe de la puissance éolienne. L'ajout de charge à 2.5s conduit évidemment à une augmentation de la production. Les oscillations au démarrage restent présentes pour les deux sources, étant donné qu'elles sont caractéristiques des génératrices et non du vent.

Les courbes ci-dessous (et même celles présentées précédemment) peuvent ne pas être parfaites, cela peut être expliqué par le fait que les blocs utilisés dans notre système

ne le sont pas non plus; néanmoins elles nous permettent d'analyser efficacement le comportement de notre système.

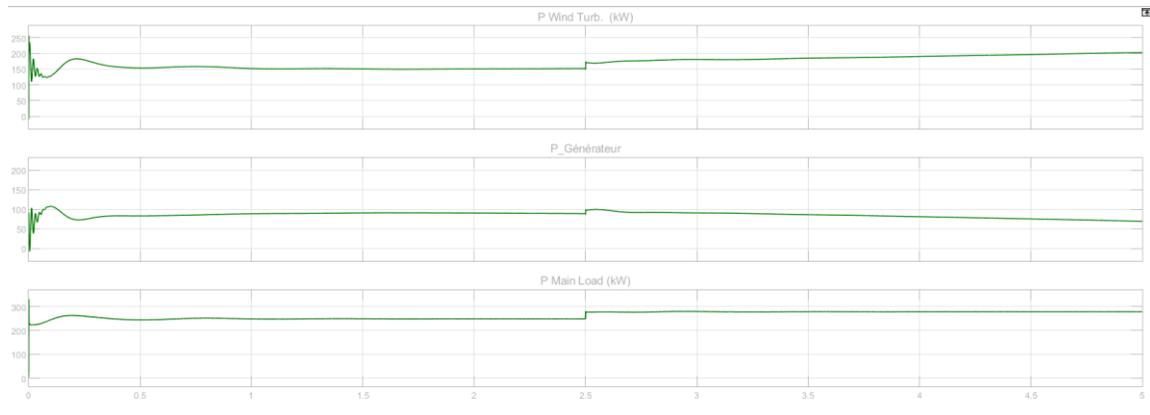


Figure 43: puissance active pour une vitesse de vent fixe

- Puissance réactive

La puissance réactive produite et consommée reste constante (après la phase d'oscillation) avec une légère variation à l'ajout de la charge supplémentaire. Ceci s'explique par le fait que la consommation en puissance réactive de l'éolienne est liée à la vitesse du vent et à la variation de celle-ci.

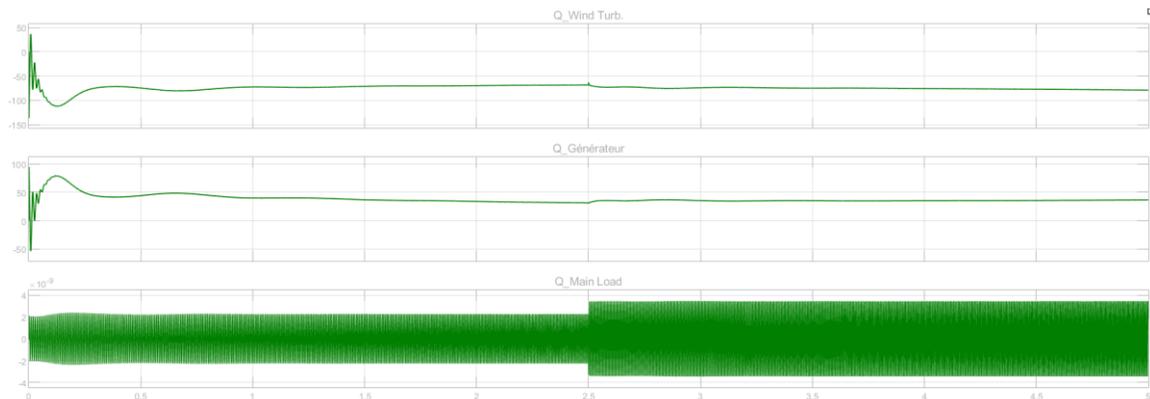


Figure 44: puissance réactive pour un vent de vitesse fixe

5.2.4. Simulation pour une charge de 250kw +150kw qui s'ajoute à 2.5 secondes

Pour cette dernière partie on effectue les simulations pendant 5 secondes avec une charge initiale de 250kw plus 150kw qui s'ajoute à 2.5s. le profil du vent est supposé favorable et fixé à [10 15 13 14 12].

- Courant et tension

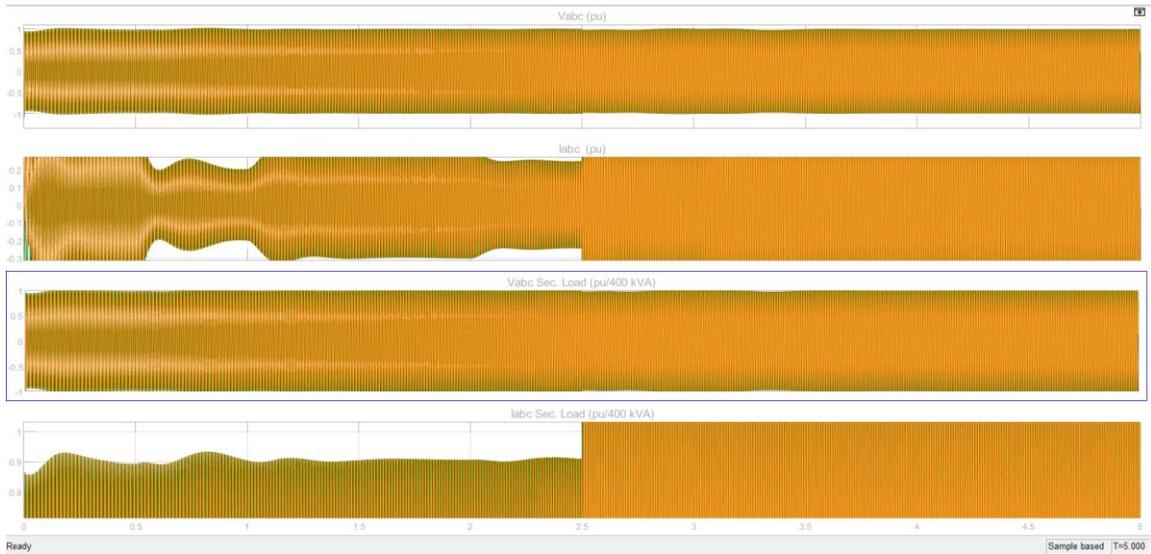


Figure 45: Courbe de tension et courant pour une charge de 250+150kw

Les courants varient pour la génératrice synchrone en fonction de sa production qui elle-même dépend de la production de la génératrice asynchrone; les tensions quant à elles restent constantes tout au long de la simulation, on observe tout de même une légère distorsion de celles-ci à 2.5 secondes (illustration représentée par le zoom de la figure 46) qui correspond au moment où la charge secondaire est additionnée à la charge principale. Cette distorsion qui n'avait pas été observée dans la section précédente s'explique par le fait que la variation de la puissance de la charge est très importante; en effet celle-ci passant de 250 à 400kw génère instantanément un appel de courant très important forçant ainsi les génératrices à augmenter rapidement leurs productions.

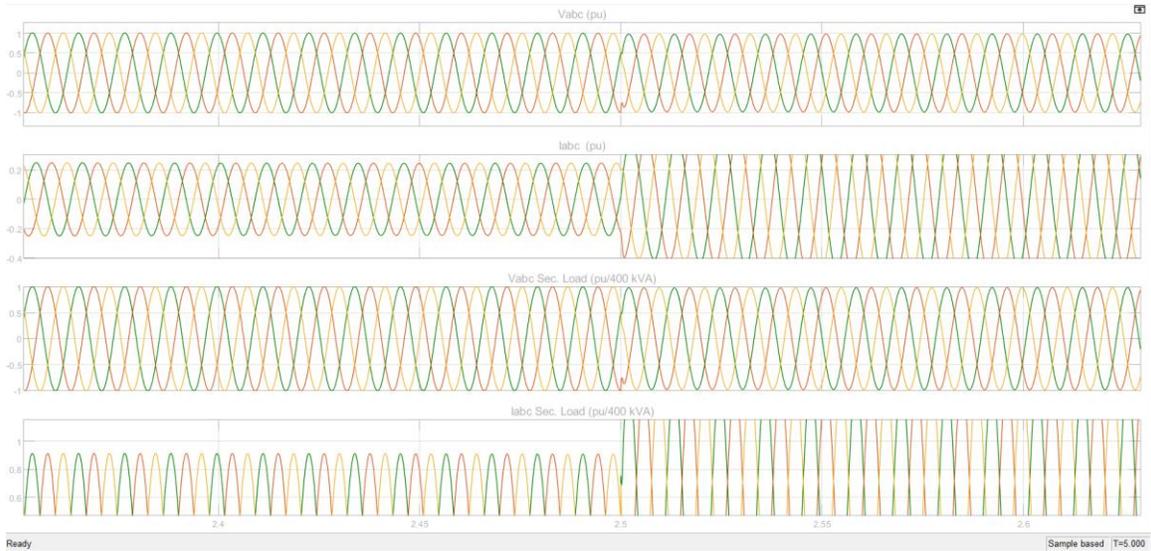


Figure 46: zoom de la caractéristique tension

- Puissance active

La courbe de la puissance active est similaire à celle de sa section précédente, c'est-à-dire qu'après la phase transitoire les deux sources s'accordent pour produire une puissance dont la somme égale la puissance nécessaire pour alimenter la charge

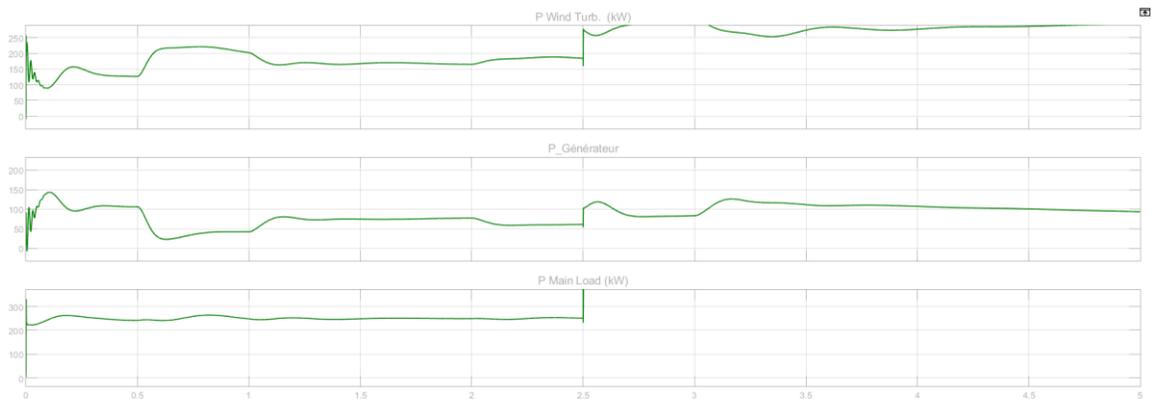


Figure 47: puissance active pur une charge de 250+150kw

- Puissance réactive

La seule nouveauté sur la courbe des puissances réactives est la grande variation de la puissance réactive consommée par la charge après l'ajout de la charge secondaire; cependant cette valeur reste négligeable car elle reste de l'ordre de 10^{-9}

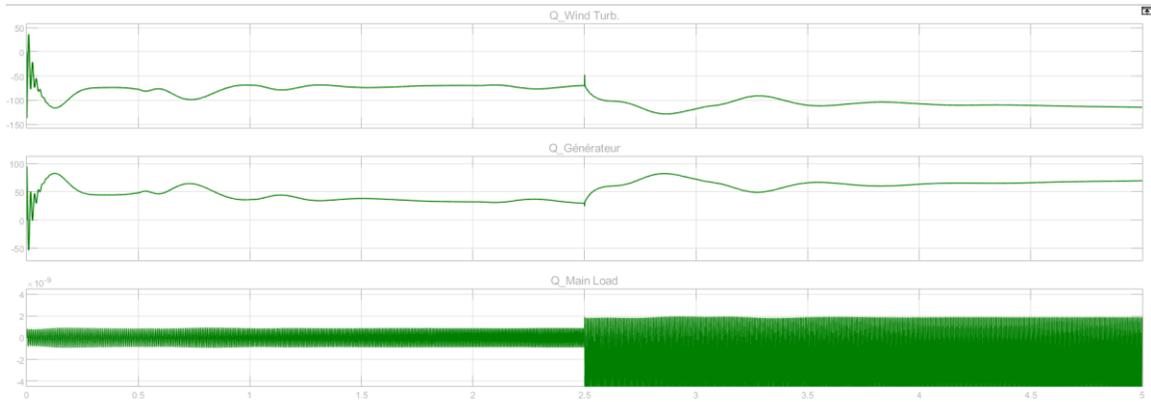


Figure 48: puissance réactive pour une charge de 250 +150kw

Conclusion

Dans ce chapitre la présentation du modèle de simulation réalisé dans MATLAB/SIMULINK[®] en utilisant les blocs fonctionnels prédéfinis du logiciel a été effectuée. Les simulations ont été faites pour différentes charges et les courbes de courant, tension et puissance ont été présentées et expliquées afin de mieux appréhender le comportement de notre système.

Conclusion générale et perspective

Les microcentrales hybrides isolées des grands réseaux sont de plus en plus présentes dans le monde de la production de l'énergie électrique; dès lors leur modélisation et leur simulation avant l'implémentation deviennent un travail crucial afin de limiter les coûts de construction. Il était question dans ce travail d'effectuer la modélisation et la simulation d'une microcentrale hydro-éolienne isolée pour l'alimentation de charges industrielles et/ou résidentielles.

Une brève revue de littérature sur les études existantes a été effectuée, ce qui nous a permis de définir les objectifs et attentes avant d'en dégager une méthodologie pour atteindre ces objectifs. Les deux systèmes à mettre en commun ont ensuite été présentés avec leur historique, leur constitution et un appui particulier a été mis sur la ressource naturel à l'origine de l'énergie primaire. Les modélisations mathématiques ont été effectuées pour les ressources primaires, les transmissions mécaniques et la turbine hydraulique; quelques résultats de simulation sont également présentés.

Les chapitre 3 et 4 ont été consacrés à la modélisation des deux sous-systèmes séparément. Les équations mathématiques traduisant le comportement interne de chaque bloc ont été développées et expliquées; ainsi les équations mathématiques de la turbine éolienne, la génératrice asynchrone qu'elle alimente, la turbine hydraulique, la génératrice synchrone qu'elle entraîne ainsi que son système d'excitation ont tous été présentés et les représentations dans le repère de Park des deux génératrices ont également été effectuées afin de faciliter l'adaptation avec les blocs MATLAB/SIMULINK®.

Dans le dernier chapitre nous avons procédé à la présentation de notre système complet c'est-à-dire la microcentrale hybride hydro-éolienne, puis nous avons effectué les simulations pour différents scénarios de fonctionnement possibles. Les caractéristiques des tensions, courants et puissance ont donc été présentées pour plusieurs profils de vent avec une charge variable d'abord faiblement et ensuite grandement. Les résultats obtenus montrent que notre éolienne à vitesse variable dont la production dépend de la vitesse du vent peut être complété efficacement par une petite centrale hydraulique à vitesse variable afin d'alimenter une charge locale en énergie électrique.

Nous avons fourni dans ce travail les équations mathématiques nécessaires à la modélisation et à la compréhension du fonctionnement d'une microcentrale hybride hydro-éolienne, ainsi que le modèle complet de simulation de cette dernière. Dans un souci de continuation et d'amélioration de ce travail, on pourrait se pencher sur :

- Une solution à la consommation de puissance réactive de l'éolienne;
- Des études de stabilité afin d'envisager une possible connexion de ce micro-réseau à un réseau déjà existant;
- Le dimensionnement d'un système pouvant réduire au maximum les oscillations au démarrage de la centrale
- Une loi de commande permettant au système de réagir plus rapidement aux variations de charges et aux variations de vitesse du vent.

Références

- [1] C. Apraez, "Étude comparative de méthodes de simulation de la stabilité transitoire," École de technologie supérieure, 2012.
- [2] N. Laverdure, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2005.
- [3] V. Courtecuisse, S. Breban, M. Nasser, A. Vergnol, B. Robyns, and M. Radulescu, "Supervision d'une centrale multi sources basée sur l'association éolien, micro hydraulique et stockage d'énergie," in *Electrotechnique du future 2007*, 2007.
- [4] K. Ah-You and G. J. Leng, *Renewable energy in Canada's remote communities*. Natural Resources Canada, 1999.
- [5] B. Multon, G. Robin, M. Ruellan, and H. B. Ahmed, "Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables," *La Revue 3 E. I*, pp. 20-33, 2004.
- [6] M. MENZER, "Analyse des performances d'un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable."
- [7] C. Luo and B.-T. Ooi, "Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 708-716, 2006.
- [8] V. Trachsel, "L'énergie éolienne et solaire: alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain," *Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences*, no. 31, 2007.
- [9] C. E. VIEIRA, C. T. FORTUNATO, and P. F. ANDRADE, "Évaluation de la capacité de pénétration de l'énergie renouvelable Réseau électrique de l'île de Boa Vista–Cap-Vert1," *La revue des énergies durables de la CEDEAO (ESEJ)*, p. 55.
- [10] I. Komusanac, D. Fraile, and G. Brindley, "Wind Energy in Europe in 2018, Trends and statistics," *Wind Europe, Brussels*, 2018.
- [11] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind energy generation: modelling and control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [12] R. Ginocchio and P.-L. Viollet, *L'énergie hydraulique*. Lavoisier, 2012.
- [13] M. Bouvard, "De l'hydroélectricité à la mécanique de fluides «tous azimuths»: Evolution des activités scientifiques et industrielles de la mécanique des fluides-hydraulique à Grenoble," *La Houille Blanche*, no. 5-6, pp. 131-138, 1994.
- [14] J. Cotillon, "L'hydroélectricité dans le monde," *La Houille Blanche*, no. 1-2, pp. 1-85, 1978.
- [15] M. M. M. Al Anfaf, "Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges," Université de Lorraine, 2016.
- [16] L. Chahal, "Coordination de systèmes multisources pour favoriser la production d'énergie électrique renouvelable," Université Lille1, Sciences et Technologies, 2013.
- [17] S. Doolla and T. Bhatti, "Load frequency control of an isolated small-hydro power plant with reduced dump load," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1912-1919, 2006.

- [18] C. Nicy and R. Punitharaji, "Isolated wind-hydro hybrid system using permanent magnet synchronous generator and battery storage with fuzzy logic controller," in *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, 2014, pp. 1-6: IEEE.
- [19] J.-Y. GRANDIDIER, "Eolien ethydrauliuie des fiançailles réussies: Europe: L'éolien sème à Saint-Cyprien," *Systèmes solaires (Revue)*, no. 165, pp. 39-42, 2005.
- [20] S. Breban, "Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique à vitesse variable," Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- [21] K. Ghdamsi, D. Aouzellag, and A. Chenna, "Conception de stratégies de controle des systèmes hybrides de production d'énergie électrique décentralisée," université A/Mira Bejaia, 2021.
- [22] O. A. Jaramillo, M. A. Borja, and J. M. Huacuz, "Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power," *Renewable energy*, vol. 29, no. 11, pp. 1887-1909, 2004.
- [23] N. SARAH and M. NAZIH, "Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical," *Université Libanaise, Faculté de Genie*, vol. 1.
- [24] D. Guérette, "Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration," Université du Québec à Rimouski, 2010.
- [25] M. H. Ali, *Wind energy systems: solutions for power quality and stabilization*. Crc Press, 2017.
- [26] C. Dragu, T. Sels, and R. Belmans, "Small Hydro Power: State of the art and applications," in *Power generation and sustainable development (Liège, 8-9 October 2001)*, 2001, pp. 265-270.
- [27] M. Nasser, "Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés," Arts et Métiers ParisTech, 2011.
- [28] P. Kundur, "Power System Stability And Control by Prabha Kundur. pdf," *Electric Power Research Institute*, 1993.
- [29] L. Hajagos and M. Basler, "Changes to IEEE 421.5 recommended practice for excitation system models for power system stability studies," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, pp. 334-336: IEEE.
- [30] H. QUÉBEC, "Caractéristiques de la tension

fournie par les réseaux moyenne

et basse tension d'Hydro-Québec," *hydroquebec.ca*, Juillet 2016.

- [31] F. Milano, "Power system modelling," in *Power System Modelling and Scripting*: Springer, 2010, pp. 3-17.
- [32] R. Datta and V. Ranganathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 18, no. 1, pp. 163-168, 2003.
- [33] A.-C. Bayeul-Laine, G. Bois, and S. Simonet, "Etude numérique instationnaire d'une micro-éolienne à axe vertical," 2010.

- [34] S. Chakkor, M. Baghouri, and A. Hajraoui, "Capteur Intelligent pour la Surveillance d'éoliennes par l'Analyse Spectrale à haute résolution," 2012.
- [35] T. Ayoub, "Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [36] T. A. Theubou Tameghe, "Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [37] T. DOUADI, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone," Université de Batna 2, 2011.
- [38] T. A. T. Tameghe, *Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada), 2012.
- [39] B. Robyns, B. François, and P. Degobert, *Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone: Désensibilisation et optimisation par la logique floue*. Editions TECHNIP, 2007.
- [40] G. G. Karady and K. E. Holbert, *Electrical energy conversion and transport: an interactive computer-based approach*. John Wiley & Sons, 2013.
- [41] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [42] J. W. Tsotie, "Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale Hydro-Québec," *Maîtrise en ingénierie, École de génie, UQAT*, pp. 64-66, 2013.
- [43] L. L. Grigsby, *Power system stability and control*. CRC press, 2007.
- [44] R. Nanaware, S. Sawant, and B. Jadhav, "Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of HPP," in *IJCA Proceedings on International Conference on Recent Trends in Information Technology and Computer Science*, 2012, pp. 6-11.
- [45] D. Tiomo, "Modélisation et simulation d'un système électrique hybride à jumelage hydroélectrique-solaire, avec stockage à batteries," *Maîtrise en ingénierie, École de génie, UQAT*, 2019.
- [46] J. Lesenne, F. Notelet, and G. Segulier, *Introduction à l'électrotechnique approfondie*. Technique et documentation Paris, France, 1981.
- [47] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, and B. James, *Electric machinery*. McGraw-Hill New York, 2003.
- [48] C. Jollette, "Développement des modèles d'essais et application à l'identification des machines synchrones et asynchrones triphasées," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [49] D. Tiomo, "Modélisation et simulation d'un système électrique hybride à jumelage hydroélectrique-solaire, avec stockage à batteries," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019.
- [50] V. Ruuskanen, M. Niemelä, J. Pyrhönen, S. Kanerva, and J. Kaukonen, "Modelling the brushless excitation system for a synchronous machine," *IET electric power applications*, vol. 3, no. 3, pp. 231-239, 2009.
- [51] I. C. Report, "Computer representation of excitation systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 6, pp. 1460-1464, 1968.

[52] B. Ge, P. Xin, and Y. Lv, "The excitation system simulation of huge hydro-generator," in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010, pp. 1-4: IEEE.

(1): <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/835-enercon-e-82-e2-2.000>.

(2): https://www.thewindpower.net/turbine_fr_233_neg-micon_nm72c-1500.php.